

Das Elementarmagneten-Modell im Physikunterricht am Gymnasium

Eine fachdidaktische Analyse der klassischen
Modelle & Konzeption und Erprobung eines
alternativen Modells

Vom Fachbereich Physik der Universität Duisburg-Essen
genehmigte Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Dr. paed.

von

BEATE HEES, geb. HOLTSCHEIDER

aus Leverkusen

Referent: Herr Prof. Dr. Gernot Born

Korreferent: Herr Prof. Dr. Edgar Heineken

Tag der mündlichen Prüfung: 01.10.2008

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei allen Personen, die mich bei dieser Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Gernot Born für die sehr angenehme Betreuung meiner Dissertation durch seine stets sehr fröhliche, motivierende und verständnisvolle Art. Ihm verdanke ich die Themenfindung der Dissertation, deren Thematik mich nach wie vor sehr begeistert. Der anregende Gedankenaustausch mit ihm zur Physik und Physikgeschichte sowie seine physikdidaktischen Veröffentlichungen waren mir eine sehr große Hilfe.

Herrn Prof. Dr. Edgar Heineken danke ich für seine sehr freundliche, positive und anspornende Unterstützung während der gesamten Arbeit. Die fruchtbaren Diskussionen mit ihm und seine kognitionspsychologischen Anregungen und Veröffentlichungen leisteten mir hervorragende Dienste.

Frau Ute Bachor und Herrn Prof. Dr. Treitz danke ich für die stets kooperative Unterstützung und sehr angenehme Atmosphäre in der Physikdidaktik.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern, meinem Bruder und meinem Verlobten, die alle auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Kapitel: Einleitung	1
1.1 Vorbemerkung	1
1.2 Grundlagen der Physikdidaktik	2
1.3 Struktur der Dissertation	4
2. Kapitel: Physikgeschichte zum Magnetismus	7
2.1 Mythen zum Magnetismus	7
2.2 Ursprung des Magnetismus(begriffes)	9
2.3 Erste Anwendungen des Magnetismus	11
2.4 Wissenschaftlich dokumentierte Überlegungen	15
3. Kapitel: Magnetismus heute - ein Überblick	22
3.1 Einführung	22
3.2 Diamagnetismus	24
3.3 Paramagnetismus	25
3.4 Ferromagnetismus	25
3.5 Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	29
3.6 Anwendungen des Magnetismus	30
4. Kapitel: Magnetismus im Physikunterricht - das Elementarmagneten-Modell	32
4.1 Blick auf das Curriculum	32
4.2 Das „klassische“ Elementarmagneten-Modell und seine Ziele	37
4.3 Zwei Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells	41
4.3.1 Modell I (freie Bewegung)	41
4.3.2 Modell II (drehbare Fixierung)	43
5. Kapitel: Kriterien zur Analyse der Modelle	45
5.1 Modelle im Physikunterricht	45
5.2 Elementarisierung und ihre Kriterien	48
5.3 Fachgerechte Elementarisierung	51
5.3.1 Theorie des Problemlösens	52
5.4 Schülergerechte Elementarisierung	55
5.4.1 Mentale Modelle des Magnetismus – ein Forschungsüberblick	55
5.4.2 Entwicklungspsychologie und ihre physikdidaktischen Folgerungen	60
5.4.3 Träges Wissen und seine lernpsychologischen Erklärung	64
5.4.4 Konzeptuelles Wissen und seine Repräsentanten	67
5.5 Zielgerechte Elementarisierung	70
5.5.1 Konzept- und Prozessziele	70
5.5.2 Soziale Ziele	72
5.5.3 Produktives Denken im Physikunterricht	74
5.6 Kriterien im Überblick	76

6. Kapitel: Analyse der zwei Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells	77
6.1 Bewertungsschema	77
6.2 Zum klassischen Modell I (Freie Bewegung)	78
6.2.1 Analyse - fachgerecht	78
6.2.2 Analyse - schülergerecht	80
6.2.3 Analyse - zielgerecht	82
6.2.4 Fazit	84
6.3 Zum klassischen Modell II (Drehbare Fixierung)	84
6.3.1 Analyse - fachgerecht	84
6.3.2 Analyse - schülergerecht	85
6.3.3 Analyse - zielgerecht	88
6.3.4 Fazit	90
7. Kapitel: Entwicklung des alternativen Elementarmagneten-Modells	91
7.1 Das alternative Elementarmagneten-Modell	91
7.2 Analyse des alternativen Elementarmagneten-Modells	99
7.2.1 Analyse – fachgerecht	100
7.2.2 Analyse – schülergerecht	101
7.2.3 Analyse – zielgerecht	102
7.2.4 Fazit	104
8. Kapitel: Erprobung des alternativen Elementarmagneten-Modells in der Praxis	105
8.1 Vorwissen zum Magneten	106
8.2 Mentale Modelle der Schüler zum Inneren eines Magneten	108
8.3 Einführung des Elementarmagneten	112
8.4 Schülervorstellungen zur Anordnung von Elementarmagneten	113
8.4.1 Anordnung in der Ebene	115
8.4.2 Anordnung im Raum	116
8.4.3 Anordnung zu einem Magneten in der Ebene	117
8.4.4 Anordnung zu einem Magneten im Raum	120
8.5 Schülervorstellungen zur Magnetisierung von Eisen	121
8.5.1 Erstellen eines Modells in Einzelarbeit	121
8.5.2 Diskussion im Plenum	122
8.5.3 Einigen auf ein Modell in Minigruppen	125
8.5.4 Schülerexperimente zur Überprüfung des gefundenen Modells	127
9. Kapitel: Überprüfung der Wirksamkeit des alternativen Elementarmagneten-Modells	129
9.1 Lernerfolgs-Kontrolle	129
9.1.1 Aufbau	129
9.1.2 Auswertung	130
9.2 Evaluation	134
9.2.1 Aufbau	134
9.2.2 Auswertung	136
10. Kapitel: Zusammenfassung und Ausblick	139
Literaturverzeichnis	141
Anhang	150

1. Kapitel

Einleitung

1.1 Vorbemerkung

Ausgangspunkt der vorliegenden Dissertation ist das klassische Elementarmagneten-Modell, genauer gesagt seine zwei Varianten, die in vielen Schulbüchern der Jahrgangsstufe 6 als Modell zur Erklärung des Magnetismus benutzt werden. Bei diesem Modell gibt es m. E. didaktische Unzulänglichkeiten. Das klassische Elementarmagneten-Modell knüpft nicht an dem Vorwissen der Schülerinnen und Schüler¹ an, und kann somit entweder innerphysikalische Widersprüche hervorrufen oder aber zu einem blinden Akzeptieren auf Seiten der Schüler führen.

Pädagogisches Ziel ist es aber, die Schüler frühzeitig zu einem kritischen Hinterfragen und produktiven Denken nach Max Wertheimer [WERT64] anzuleiten. Blindes Akzeptieren und Auswendiglernen fördert keinen Verstehensprozess und kann daher kein gangbarer physikdidaktischer Weg sein, da die Schüler keine Einsicht gewinnen und keine kognitiven Strukturen [ANDE96] ausgebildet werden. Es entsteht allenfalls Träges Wissen [RENK96], das aber in der Praxis der Schülerlebenswirklichkeit keinen Bestand hat.

Deshalb besteht das physikdidaktische Ziel der vorliegenden Dissertation darin, zu überprüfen, in wie weit es sinnvoll ist, die vorhandenen klassischen Modelle beizubehalten oder ein neues Elementarmagneten-Modell in der Jahrgangsstufe 6 des Gymnasiums einzuführen. Dazu wurde ein alternatives Elementarmagneten-Modell entwickelt, in der Jahrgangsstufe 6 erprobt, und eine fachdidaktische Analyse in Theorie und Praxis vorgenommen.

¹ Im Text wird, zwecks besserer Lesbarkeit, das generische Maskulinum verwendet. Hiermit wird keine Geschlechterunterscheidung impliziert.

1.2 Grundlagen der Physikdidaktik

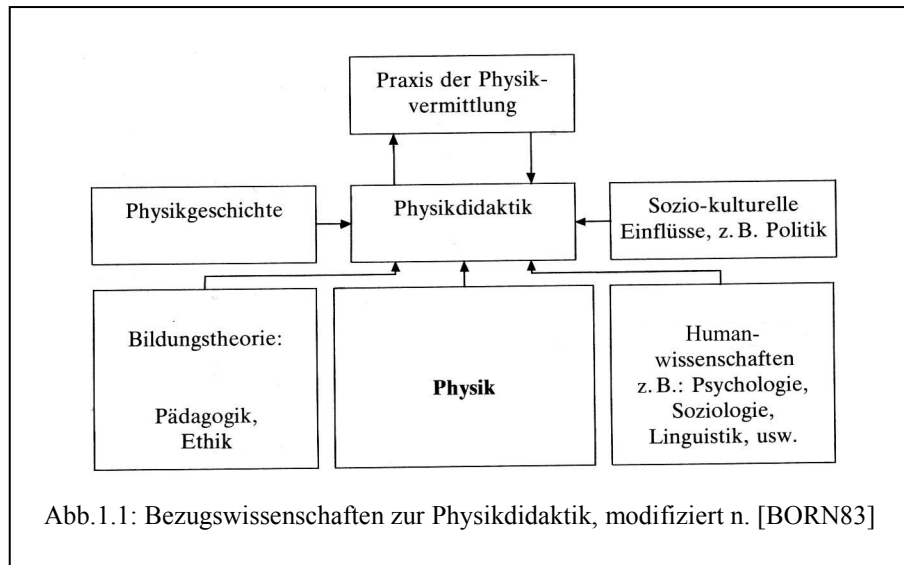
Um eine physikdidaktische Analyse vorzunehmen, muss man sich mit der Didaktik der Physik auseinandersetzen. „Die Didaktik der Physik ist die Berufswissenschaft der Physiklehrer; sie überprüfen die Fachwissenschaft Physik mit den Methoden von Erziehungswissenschaft, Soziologie und Psychologie auf ihre Umsetzbarkeit im Physikunterricht und realisiert gegebenenfalls einen Transfer.“[BORN83]

Physikalische Kenntnisse und Theorien sind für den Physiklehrer notwendig, jedoch alleine nicht hinreichend. „Oft zeigt sich, dass mancher, der komplizierte Experimente oder schwierige Berechnungen erfolgreich durchführt, nicht in der Lage ist, Jugendliche für Physik zu begeistern oder sich in die Überlegungen eines Kindes hineinzudenken.“ [BORN83]

Die Kunst des Physiklehrers besteht darin, die Schüler bei ihren Vorstellungen, mentalen Modellen (siehe Kapitel 5.4.1), abzuholen, und den Stoff derart zu strukturieren und zu sequenzieren, dass er sich für die Schüler eigenständig, produktiv denkend (siehe Kapitel 5.5.3) und mittels Experimenten erschließen lässt.

Dazu benötigt der Physiklehrer weitere Bezugswissenschaften, die eine bedeutende Rolle für die Physikdidaktik und somit letztlich für guten Physikunterricht spielen. Auf genau diese verschiedenen Bezugswissenschaften der Physikdidaktik wird im Rahmen der hier vorliegenden Dissertation eingegangen. Um die Analyse der beiden Varianten des „klassischen Elementarmagneten-Modells“ und des „alternativen Elementarmagneten-Modells“ durchzuführen, muss ein Gesamtblick auf die benötigten Bezugswissenschaften der Physikdidaktik geworfen werden. Sie sind in der Abbildung 1.1 dargestellt.

Im Zentrum dieser Abbildung steht die „Physikdidaktik“ selbst. Sie befindet sich in wechselseitiger Interaktion mit der „Praxis der Physikvermittlung“. Die Fachdidaktik beschäftigt sich allgemein mit Zielen, Inhalten und Methoden des Physikunterrichtes. Insbesondere ist es ihre Aufgabe als Fachdidaktik, „die Auswahl und die Sequenzierung von Unterrichtsinhalten vorzunehmen und zu begründen.“[HEIN87]



Die Ergebnisse dieser physikdidaktischen Überlegungen wirken sich auf die Praxis der Physikvermittlung aus. Im Gegenzug dazu lassen sich dann aus der Praxis Rückschlüsse und Folgerungen für die Fachdidaktik ableiten. Damit dieses ständige Wechselspiel von Theorie und Praxis gelingen kann, verfügt die Physikdidaktik über Bezugswissenschaften, die für diesen Prozess unabdingbar sind.

Eine notwendige Bezugswissenschaft für die Physikdidaktik stellt die „Physik“ als Wissenschaft dar, dies wird visuell auch durch den Fettdruck in Abbildung 1.1 verdeutlicht, und ist inhaltlich offensichtlich. Ein Überblick zum Thema Magnetismus wird im Kapitel 3 dargestellt.

Wie aber oben bereits angedeutet, reicht die physikalische Kenntnis alleine nicht aus. Auch der Part der „Physikgeschichte“ ist zu beachten. Durch die historische Betrachtung kann man nicht nur die Physik tiefer verstehen, man kann auch den jeweiligen Schwierigkeitsgrad eines Themas eher abschätzen und ggf. die Geschichte der Physik als Anregung zur Motivation oder zur Unterrichtsstrukturierung nutzen. [BORN83] Solch eine Strukturierung und Sequenzierung der Inhalte, die sich an der historischen Entwicklung des Faches orientiert, wird „gnoseogenetisches Prinzip“ genannt. Dabei bezieht sich die Anordnung der Lerninhalte auf die Abfolge der wissenschaftlichen Erkenntnisse, der Gnosis. [HEIN87] Um diesen physikgeschichtlichen Aspekte näher zu beleuchten, wird im Kapitel 2 auf die Physikgeschichte zum Magnetismus eingegangen. Im Kapitel 7.1 wird über eine Parallelität im unterrichtlichen und historischen Vorgehen diskutiert.

Eine weitere Bezugswissenschaft zur Physikdidaktik stellt die Bildungstheorie dar. Sie fokussiert die Bildung des ganzen Menschen im Gegensatz zur Ausbildung einzelner Fähigkeiten. Auf diesen Aspekt wird insbesondere bei den Zielen des Physikunterrichts eingegangen. (vgl. Kapitel 5.5)

Auch die Humanwissenschaften unterstützen die Aufgaben der Physikdidaktik, insbesondere die Entwicklungspsychologie und die Kognitionspsychologie wird hier betrachtet und, bezogen auf den Magnetismus, im Kapitel 5 dargestellt.

Zuletzt müssen auch noch die soziokulturellen Einflussfaktoren beachtet werden. Alleine die geltenden Curricula spielen eine entscheidende Rolle zur Gestaltung des Physikunterrichtes. Im Kapitel 4.1 wird das Spiralcurriculum² für NRW in Bezug auf den hier zu betrachtenden Magnetismus dargestellt.

1.3 Struktur der Dissertation

Im folgenden Kapitel 2 wird die Physikgeschichte zum Magnetismus beleuchtet, um daraus Folgerungen für den Physikunterricht abzuleiten, im Sinne des beschriebenen gnoseogenetischen Prinzips (vgl. Kapitel 1.2). Beginnend mit Mythen und Mystiken, die dieses geheimnisvolle Phänomen des Magnetismus umgeben, konnten anschließend erste Anwendungen des Magnetismus ausfindig gemacht werden, bis hin zum Beginn der Lehre des Magnetismus.

Das Kapitel 3 schließt mit dem Magnetismus als Wissenschaft, der fundamentalen Bezugswissenschaft zur Physikdidaktik, an. Es wird ein Überblick über die physikalischen Theorien und Modelle des quantenmechanischen Phänomens Magnetismus gegeben. Zudem enthält das Kapitel eine Übersicht über die aktuellen Anwendungen und Technologien zum Magnetismus.

² Ein Spiralcurriculum ordnet die Themen so an, dass die zu behandelnden Inhalte in verschiedenen Jahrgängen auf entsprechend höherem Niveau immer wieder vertieft aufgegriffen werden.

Daran anknüpfend stellt das Kapitel 4 die Behandlung des Magnetismus im Physikunterricht dar. Begonnen wird mit einem Einblick in aktuelle Richtlinien und Lehrplänen. Schwerpunktmäßig wird dann auf die Praxis der Vermittlung eingegangen. Es wird das klassische Elementarmagneten-Modell (in zwei Varianten: Modell I und II) sowie seine fachdidaktischen Ziele vorgestellt.

Das Kapitel 5 geht auf die Theorien der Physikdidaktik ein. Begonnen wird mit der didaktischen Bedeutung von Modellen im Physikunterricht. Anschließend wird die Theorie zur Elementarisierung vorgestellt. Sie stellt das Kernstück zur Analyse der Modelle dar. Eine gelungene Elementarisierung zeichnet sich durch drei Kriterien (fachgerecht, schülergerecht, zielgerecht) aus, anhand derer die Modelle beurteilt werden. Diese drei Kriterien werden unter den verschiedensten Sichtweisen der Kognitionspsychologie, der Physikdidaktik, der Pädagogik, der Entwicklungspsychologie und dem aktuellen Stand der Wissenschaft ausführlich dargestellt und gegeneinander abgegrenzt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Übersicht zu diesen drei Kriterien.

Das Kapitel 6 überprüft das klassische Elementarmagneten-Modell in seinen beiden Varianten anhand der im vorherigen Kapitel erläuterten drei Kriterien. Zur übersichtlichen theoretischen Analyse wird zu Beginn ein Bewertungsschema vorgestellt und anschließend die Analyse begründet vorgenommen. Dabei zeigen sich Grenzen dieser momentanen Wissensvermittlung im Physikunterricht beim Thema des Magnetismus auf.

Anlässlich der Ergebnisse aus Kapitel 6 stellt das Kapitel 7 ein alternatives Konzept zur Wissensvermittlung zum Thema des Elementarmagneten-Modells in der Schule vor. Kernstück dessen ist das „alternatives Elementarmagneten-Modell“. Dieses wird aus den Erkenntnissen der Physikgeschichte (Kapitel 2), des Magnetismus als Wissenschaft (Kapitel 3), den Vorgaben des Curriculums (Kapitel 4) sowie aus den Erkenntnissen der Physikdidaktik, der Pädagogik, der Entwicklungspsychologie und der Kognitionspsychologie (Kapitels 5) hergeleitet. Es erfüllt die physikdidaktischen Ziele und wird der gleichen theoretischen Analyse (Kapitel 6) bezüglich der drei Kriterien unterzogen wie die zwei Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modell.

Nach dem sehr guten theoretischen Abschneiden des alternativen Elementarmagneten-Modells wurde es in zwei Lerngruppen der Jahrgangsstufe 6 an Gymnasium in Nordrhein-Westfalen in der Praxis erprobt. Das Kapitel 8 stellt das Herzstück der Dissertation dar, da es beschreibt, wie positiv und mit wie viel Freude die Schüler eigenständig und produktiv gedacht haben, und sich so, nur mittels ihrer Vorkenntnisse, das alternative Elementarmagneten-Modell eigenständig logisch erschlossen haben.

Das Kapitel 9 dient der Bestätigung der Wirksamkeit des alternativen Elementarmagneten-Modells. Durch eine Lernerfolgs-Kontrolle konnte das tatsächlich vorhandene Wissen und die beherrschten Kompetenzen in der Auseinandersetzung mit dem Thema Magnetismus überprüft werden. Zudem wurde eine Evaluation mit den Schülern durchgeführt, die die Sichtweise der Schüler auf das Lernarrangement bezüglich des alternativen Elementarmagneten-Modells fokussiert. Die Auswertung der Ergebnisse der Lernerfolgs-Kontrolle sowie der Evaluation bestätigen die sehr positive Wirkung des alternativen Elementarmagneten-Modells.

Anschließend werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick der Dissertation gegeben.

2. Kapitel

Physikgeschichte zum Magnetismus

2.1 Mythen zum Magnetismus

Der Magnetismus übte schon seit der Antike eine mythische und faszinierende Wirkung auf Menschen aus. Er erschien ihnen wie eine geheimnisvolle Kraft, und war ihnen unerklärlich. So ließ der Magnetismus viel Raum für Spekulationen, wie sich an einigen überlieferte Sagen und Erzählungen aus Europa schlussfolgern lässt.

In dem französischen "Roman d'Enéas", der 1160 erschien, wird beispielsweise erwähnt, dass „die Mauern von Karthago mit Magneten besetzt gewesen seien und Feinde in eisernen Panzerungen festgehalten haben“. [REHF03]

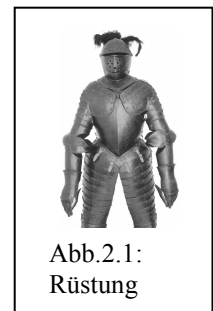


Abb.2.1:
Rüstung

Eine andere Legende besagt, der Magnetstein helfe einem Mann, die Treue seiner Gattin zu überprüfen. Dazu lege er den Magnetstein unter ihr Kopfkissen. Sei sie treu gewesen, so werde sie ihren Ehemann sofort begehren, anderenfalls falle sie aus dem Bett. So sollen angeblich Männer, die von der Treue ihrer Frauen überzeugt waren, den Magnetstein als Aphrodisiakum verwendet haben. [FRIE03] (vgl. [FRIE95])

Originaltext aus dem Steinbuch von Volmer (13. Jahrhundert):

*und swelch frouwe der ir man
mit nichte holt werden kan,
diu sol den stein am halse tragen:
so wirt er an dem dritten tage
dem selben wibe*

*holt als sim eigen libe.
ist aber ein wip ir man gram
so sol er tuon alsam.* [FRIE03]

Eine weitere Sage aus dem Mittelalter erzählt von einem Magnetberg im hohen Norden. Wenn die Schiffe ihm zu nahe kamen, soll er alle Eisennägel aus ihnen herauszogen haben. So seien die Schiffe auseinander gefallen und alle Seefahrer grausam ertrunken. [FRIE03] In der Abbildung ist diese Seefahrerlegende dargestellt.

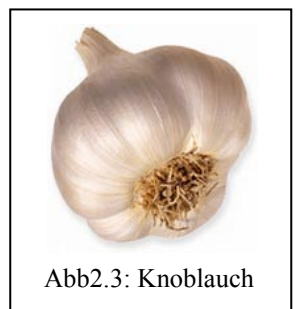


Scheitern, Eva Zeller

*Unser Holzschiff nähert / sich einem
Magnetberg / gleich werden alle Nägel /
aus seinem Leib gezogen //*

*Wer von uns beiden der / bessere
Schwimmer ist / für den wird das Er-
/trinken langsamer gehen.* [ZELL71]

Ein weiterer Irrglaube bestand darin, dass ein mit Knoblauch eingeriebener Magnet seine Kraft verlieren würde. Dies ging soweit, dass man fürchtete, dass der Knoblauchatem den Schiffskompass entmagnetisieren könnte. Bis ins 18. Jahrhundert war für den Verzehr von Knoblauch für einen Steuermann der Britischen Marine die Prügelstrafe ausgesetzt. [STER01b]



2.2 Ursprung des Magnetismus(begriffes)

Die ersten magnetischen Funde werden den Chinesen zugeschrieben. Schätzungen gehen davon aus, dass dort bereits um 3000 vor Christus *magnetische Steine* bekannt waren.

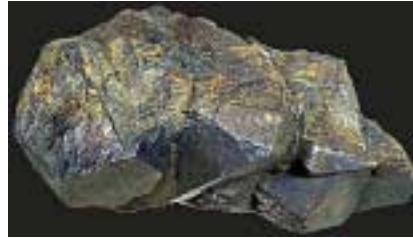


Abb2.4 : Magnetstein [REHF03]

Diese Magnetsteine bestehen chemisch und mineralogisch aus einer Form von Magnetit (Fe_3O_4 - ein kristallines Eisenoxyd), ihr Vorkommen ist aber im Verhältnis zum Vorkommen von Magnetit sehr selten. Generell kann nicht jeder Magnetit ein Magnetstein werden, dazu ist zum einen eine besondere Zusammensetzung der Kristallstruktur notwendig, und zum anderen muss ein starkes Magnetfeld von außen auf den Stein einwirken, welches eine größere Stärke als das Erdmagnetfeld aufweist. Solch ein starkes Magnetfeld kann durch einen Blitzeinschlag hervorgerufen werden, wie Dr. P. Wasilewski vom Goddard Space Flight Center der NASA experimentell bestätigt hat. Ihm gelang es, im Langmuir Laboratorium³ natürlichen Magneteisenstein zu gewinnen, in dem er gezielte Blitzschläge auf Magnetit geeigneter Kristallstruktur richtete. Das aus dem kurzzeitigen Stromfluss resultierende Magnetfeld kann den Magnetit bis zur Sättigung magnetisieren. [STER01a]



Abb2.5: Blitzeinschlag im Langmuir Laboratorium [STER01a]

³ Das Langmuir Laboratorium ist ein Zentrum der Gewitterforschung, das auf dem Gipfel des Berges South Baldy nahe Socorro im US Bundesstaat New Mexico liegt, wo besonders viele Blitze einschlagen.

Nach China war um ca. 800 vor Christus der Magnetstein auch in Griechenland, und gegen 500 vor Christus in Europa bekannt.

Die erste europäische Aufzeichnung stammt von Thales von Milet, der die Anziehungskraft von Magnetsteinen, die in der Provinz Magnesia in Kleinasien vorkamen, auf Eisenteilchen beschrieb. Er erwähnte auch erstmals die Wirkung von Bernstein. [REHF03] Thales ging dabei von der Vorstellung aus, dass im gesamten Kosmos ein „göttlichen Prinzips der Bewegung anwesenden“ sei. Daher wurde „Magnet- und Bernsteinen zur Erklärung der merkwürdigen bewegenden (anziehenden) Eigenschaft eine Art Seele zugeschrieben“. [REHF03] Der Begriff der Seele wird hierbei in Abgrenzung zum Körper, als etwas Besonderes, vom Körper verschiedenes, verstanden.



Thales Aufzeichnungen zur Folge war die Provinz **Magnesia**, in Kleinasien, die heutige Stadt Smyrna (Izmir) / Türkei eine häufige Fundstelle der Magnetsteine. Einer Theorie nach soll der Magnetismus seinen Namen von dieser Fundstelle erhalten haben.

Tatsächlich ist die Namensherkunft jedoch ungewiss. Eine andere Theorie zur Namensgebung findet man in der ältesten vollständig überlieferten Enzyklopädie „Naturalis Historia“ (Naturgeschichte). Sie wurde vom römischen Historiker und Schriftsteller Gaius Plinius Secundus (ca.23 – 79 n. Chr.) verfasst und erzählt dazu folgende Legende:

*Ein griechischer Hirtenjunge namens „**Magnes**“ soll mit einem Hirtenstab in der Hand über den Berg Ida (auf Kreta) gegangen sein. Dabei wurde die Eisenspitze seines Hirtenstabes so stark von einem Stein angezogen, dass Magnes ihn nur mit Mühe losreißen konnte. Nach diesem Hirten soll der Magnetismus benannt worden sein. [REHF03]*

Auch an dieser Legende könnte ein Funke Wahrheit stecken. Denn zur Verwandlung des Minerals Magnetit in Magnetstein ist ein Blitzeinschlag förderlich, und bekanntlich sucht sich ein Blitz meist hoch gelegene Einschlagsziele wie einen Berg.

2.3 Erste Anwendungen des Magnetismus

Nicht nur die ersten magnetischen Funde, auch die ersten Anwendung des Magnetismus gehen auf China zurück. Der Chinese Hanfuzius (280-233 v. Chr.) fertigte aus Magnetstein einen leicht drehbaren Löffel an, dessen Stiel sich immer nach Süden ausrichtet.



Dieser sogenannte „Si Nan“ (Südzeiger, Südweiser, Richtungsweiser) wurde damals nicht als Kompass genutzt, sondern war eine Art göttlicher Hilfe zum Ausrichten von Straßen und Häusern. Er diente der Wahrsagerei und spielte eine Rolle bei mythischen Riten, Zeremonien oder magischen Handlungen. [REHF03]

So gab er zum Beispiel eine günstige Position der Grabstätte an. Nach Simonyi [SIMO04] wurde dazu der Löffel auf einer mit verschiedenen Bildern und magischen Zeichen versehenen Tafel in Umdrehung versetzt. Nach seinem Stillstand hat man anhand der vom Löffelstiel überdeckten Schriftzeichen und Bilder über die Lage der Grabstelle befunden.



Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Löffel aus Magnetit angefertigt wurden, sondern auch aus anderen seltenen und wertvollen Materialien wie z.B. aus Jade. Von den Chinesen wurde jedoch bemerkt, dass der Magnetit-Löffel sich immer in der Nord-Süd-Richtung positionierte. [FINC05]

Heutzutage wird der Si Nan immer noch im Feng Shui - der chinesischen Kunst, Lebensräume harmonisch zu gestalten – benutzt. [REHF03]

Ein erster Kompass aus Magnetstein ist wahrscheinlich während der Qin-Dynastie (221 - 206 v. Chr.) entwickelt worden. Man geht davon aus, dass im Jahr 101 v. Chr. die Ostküste Indiens von chinesischen Seefahrern mit Hilfe des Kompasses gefunden wurde. [FINC05]

Zwischen dem 4. und 10. Jahrhundert entdeckten die Chinesen schließlich die Remanenz von Eisen. Sie konnten Eisennadeln mit Magnetsteinen magnetisieren, und diese sich ausrichten lassen. So entstand zum Beispiel der "Schwimmende Fisch".

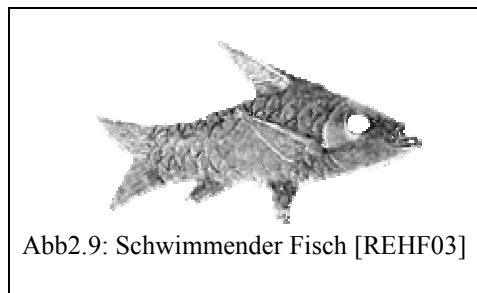


Abb2.9: Schwimmender Fisch [REHF03]

Dabei handelt es sich um einen kleinen eisernen Fisch, der dank seiner Bootsform auf der Oberfläche einer Wasserschale schwimmen kann, und wegen seiner Magnetisierung nach Süden zeigt. Aus militärischen Schriften ("Wu Ching Tsung Yao", 1044), die sich unter anderem mit dem "Finden des Richtigen Weges" beschäftigen, ist bekannt, dass Truppen bei finsterner Nacht oder bei schlechtem Wetter den Fisch zu Hilfe nahmen. [REHF03]

Das erste Buch, das darüber eine klare Beschreibung angibt, wurde von Shen Kua (Philosoph, Wissenschaftler, Techniker; 1031-1095) im Jahre 1086 verfasst. In seinem Werk "Meng ch'i pi t'an" beschrieb er das Reiben einer Eisennadel an Magnetstein, die Nutzung eines Magneten für die Navigation und die Deklination, und die verschiedenen Lagermöglichkeiten einer Magnetnadel, nämlich Schwimmen, Balancieren und Hängen (siehe Abbildung 2.10).

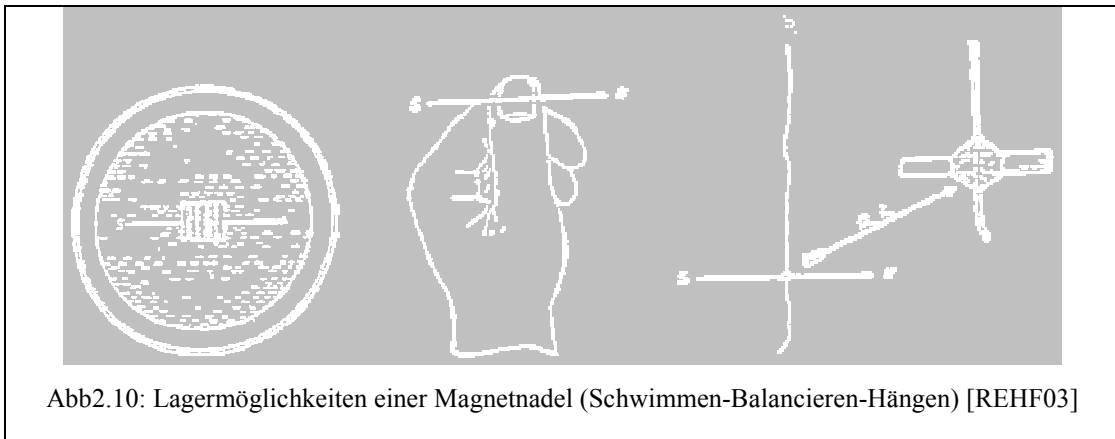


Abb2.10: Lagermöglichkeiten einer Magnetnadel (Schwimmen-Balancieren-Hängen) [REHF03]

Die Geschichte des Magnetismus wurzelt nicht nur in der chinesischen Kultur, sondern auch in der europäischen. In Europa wird der Kompass jedoch erst ein Jahrhundert später erwähnt, und zwar vom englischen Mönch Alexander Neckham (1157 -1217). Sein Werk "De naturis rerum" („Über die Natur“) beschreibt den Kompass als magnetisierte Nadel, die auf einer Pfeilspitze lagert und immer zum Polarstern zeigt.

1269 erschien vom Franzosen Pierre Pélerin de Maricourt, genannt **Petrus Peregrinus** ("der Pilger"), ein Werk, das Jahrhunderte lang das Standardwerk des Magnetismus darstellte. Er schrieb in Form eines Briefes die "Epistola de magnete" (Brief über die Magnete). [BALM56]

Bemerkenswert an seinem Werk war, dass es von der damals üblichen Arbeitsweise, der Auslegung vorhandener Schriften, abwich und eines der frühesten Zeugnisse experimenteller Forschung im Mittelalter darstellt. Jedoch konnte er sein zweiteiliges Werk noch nicht ganz von den antiken Vorstellungen zum Magnetismus befreien. [SCHL06]

Der erste Teil beschreibt die Eigenschaften des Magnetsteins. Petrus Peregrinus experimentierte mit einem kugelförmig geschliffenen Magnetstein und mit Magnetnadeln. Er benutzt dabei als erster das Wort 'Pol', das er in Analogie zum Himmelsgewölbe Nord- und Südpol nannte, und zeigt Methoden für das Auffinden des Nord- und Südpols auf.

Weiter beschreibt er den Effekt, dass gleichnamige Pole sich abstoßen und ungleichnamige sich anziehen. Dabei sah er die Magnetpole als Sitz von Kräften. Zudem stellt Peregrinus fest, dass beim Zerschneiden einer Magnetenadel wieder ganze Magnete mit je zwei Polen entstehen.

Im zweiten Teil beschreibt er einige Instrumente, die die Eigenschaften des Magnetismus nutzen, so lieferte er der westlichen Welt z. B. den Kompass. Peregrinus ging dabei noch von der Existenz so genannter *Himmelspole* aus, deren Kraft die Magnetenadel beeinflusst würde. Aufgrund seiner Vorstellung spricht man heute noch davon, dass die Kompassnadel die Himmelsrichtung anzeigt, obwohl doch bekanntlich nicht der Himmel, sondern die Erde mit ihrem Erdmagnetfeld die Ausrichtung der Kompassnadel hervorruft. [BALM56]

1570 bringt Gerhard Mercator, nach Erfindung der Kompassnadel, eine Weltkarte heraus, die besonders an die Navigationsbedürfnisse der Seeleute angepasst ist. Seine *Karte ad usum navigantium* (zur Nutzung bei der Navigation) ist eine winkeltreue Projektion der Erdkugel auf die Ebene. Die Winkeltreue ermöglicht es den Seeleuten, die auf der Karte abgelesenen Winkel direkt zur Navigation zu nutzen. Bei einer Atlantiküberquerung beispielsweise musste man im Heimathafen den Kurswinkel zum Zielhafen ermitteln und konnte dann die ganze Zeit immer entlang dieses Winkels fahren. (Diese so genannte Loxodrome ist zwar nicht der kürzeste Weg, das wäre die Orthodrome, aber die am einfachsten zu navigierende Strecke, da nicht ständig der Fahrtwinkel angepasst werden muss.)

Ein Nachteil der Merkator-Projektion ist die Tatsache, dass sie nicht zugleich auch flächentreu sein kann. So werden zu den Polen hin die Verzerrungen immer größer. Der Kontinent Afrika und die Insel Grönland sind nach dieser Kartenprojektion fast gleich groß dargestellt, obwohl Afrikas Fläche vierzehnmal größer ist als die von Grönland. [KRÜC94] [BUCH94]



Abb2.11: Mercator – Projektion

2.4 Wissenschaftlich dokumentierte Überlegungen

Im Jahre 1600 veröffentlichte der Engländer **William Gilbert** (1540-1603) und spätere Leibarzt der Queen Elizabeth I, sein berühmtes Werk „De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete tellure“, („Über den Magneten, die magnetischen Körper und den großen Magneten Erde“) (oder kurz „De magnete“).

Seine Forschungsmethode war *rein* experimentell und er haftet nicht mehr an antiken Autoren und mittelalterlichen Vorurteilen, sondern widmet lange Abschnitte seines Buches der kritischen Prüfung früherer Schriften.

So ging er unter anderem der Behauptung nach, dass Knoblauch durch Reiben einem Magneten seine Kraft rauben würde (vgl. Kapitel 2.1). William Gilbert kommentierte sein Versuchsergebnis damit, "dass in der Philosophie viele falsche und eitle Schlüsse aus Fabeln und Falschheiten erwachsen" seien. [STER01e]

Insgesamt experimentierte William Gilbert 18 Jahre bis zur Fertigstellung seines Buches und übernahm auch Teile des Werks von Petrus Peregrinus.

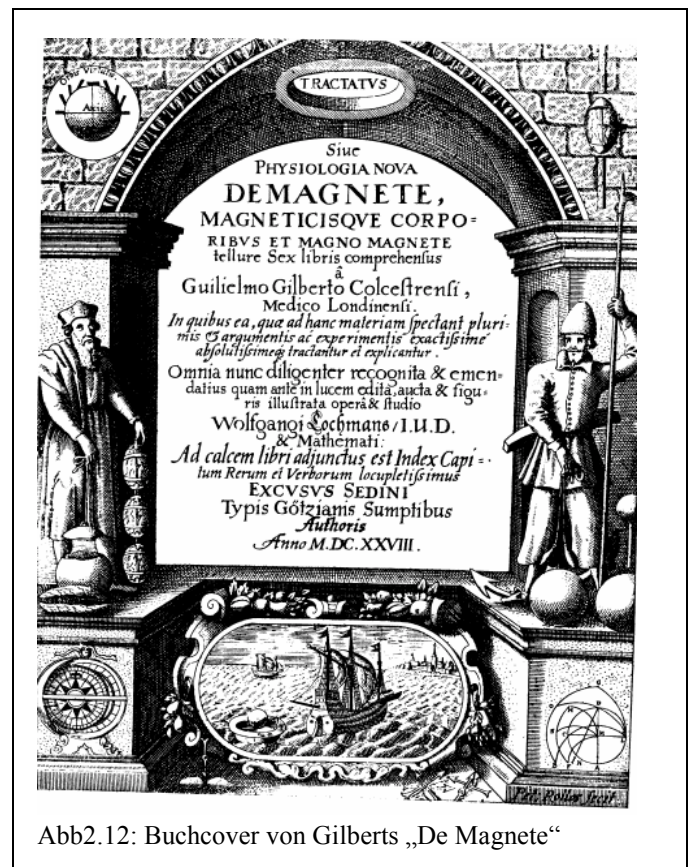


Abb2.12: Buchcover von Gilberts „De Magnete“

Gilbert experimentierte ebenfalls mit einem kugelförmigen Magnetstein, den er "Terrella" (kleine Erde) nannte, denn er erkannte die Analogie zwischen dem Erdmagnetfeld und dem Magnetfeld des Steins.

Seine zentrale Aussage lautet: „Magnus magnes ipse est globus terrestris“ (Die Erde selbst ist ein großer Magnet). Zudem stellte William Gilbert fest, dass die zwei magnetischen Pole der Erde in der Nähe der geographischen Pole liegen, aber nicht mit diesen zusammenfallen.

Zum Kompass fand er heraus, dass er nicht, wie man geglaubt hatte, zu einem Himmelspol oder sagenhaften Magnetberg im hohen Norden weist, sondern dass die Magnetnadel des Kompasses zu den Magnetpolen der Erde zeigt.

Er beschrieb, wie man mit einem kleinen kugelförmigen Magneten diese Verhältnisse selbst auf experimentellem Wege nachprüfen kann:

Man nehme einen Magnetstein und gebe ihm durch Abschleifen die Form eines Balles. Dann, um die Pole zu finden, die den Polen der Erde entsprechen, nimm den runden Stein in deine Hand und lege auf ihn eine Nadel oder ein Stück Eisendraht: Die Enden des Drahtes bewegen sich um ihren Mittelpunkt und kommen plötzlich zum Stehen. Nun markiere mit Ocker oder Kreide, wo der Draht stillliegt und haftet. Dann bewege den Mittelpunkt oder das Zentrum des Drahtes zu einer anderen Stelle, und so ein drittes und viertes Mal, immer den Magnetstein längs des Drahtes markierend, wo dieser stillsteht: Die so markierten Linien werden Meridiankreise darstellen, oder Kreise gleicher Meridianen auf dem Stein oder der Terrella und offensichtlich werden sie alle an den Polen des Steins zusammenlaufen. [GILB00]

Ein weiteres bekanntes Experiment von William Gilbert sieht man schon auf seinem Buchcover, die rechts abgebildete Person – wahrscheinlich er selbst – führt es durch. Gilbert vermutete nämlich, dass Eisen in der Nähe eines Magneten zeitweilig selbst zu einem Magneten würde. Diese Hypothese des zeitweiligen induzierten Magnetismus bestätigte er durch folgendes Experiment (siehe Abb.2.12 und 2.13).

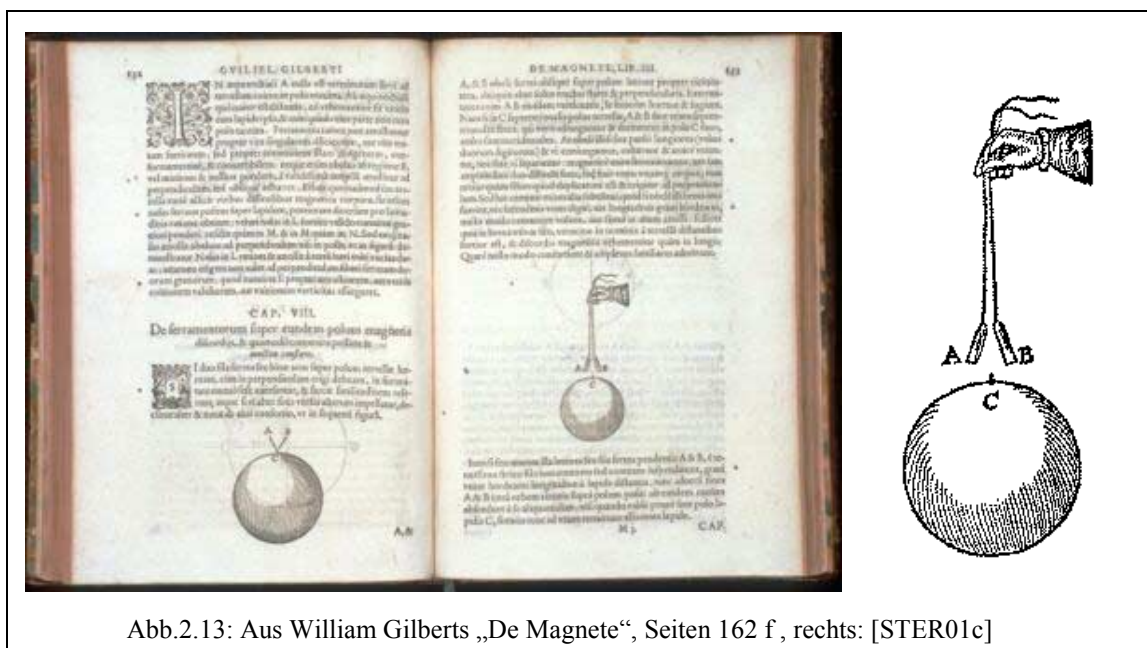


Abb.2.13: Aus William Gilberts „De Magnete“, Seiten 162 f, rechts: [STER01c]

Mit Bindfäden hängte er zwei Eisenstückchen parallel über den Pol einer Terrella und beobachtete, dass sie sich gegenseitig abstießen. Unter dem Einfluss der Terrella wurden folglich beide Eisenstücke zu einem zeitweiligen Magneten, und zwar gleicher Polarität, so dass sich die beiden Pole jeweils abstießen. [STER01a]

William Gilbert versuchte auch die Ursachen des natürlichen Magnetismus zu erforschen. In seinem Werk "De Magnete" zitierte er die folgende Passage aus einem Buch, das in Italien erschienen war: [STER01a]

"Ein Drogist zu Mantua zeigte mir ein Stück Eisen, das vollständig in einen Magneten verwandelt worden war und ein anderes Eisenstück anzog, ganz so, wie dies ein vergleichbarer Magnet auch tut. Nun war dieses Stück Eisen, da es lange Zeit ein steinernes Ornament an der Turmspitze von St. Augustine in Rimini gehalten hatte, mit der Zeit vom Winde verbogen worden, und es blieb auch so für eine Spanne von zehn Jahren. Als die Mönche es wieder in seine ursprüngliche Form zurück biegen wollten und es einem Schmied übergaben, entdeckte ein Bader namens Meister Giulio Cesare, dass es magnetisch war und Eisen anzog."[STER01a]

Wie in Kapitel 2.2 ausführlich erklärt wurde, ist heute bekannt, dass nicht die Dauer, sondern die Stärke des Magnetfeldes für die Magnetisierung von Bedeutung ist. Daher ist es wahrscheinlich, dass der Kirchturm Blitzschlägen ausgesetzt war, die zur Magnetisierung des Eisens geführt haben.

William Gilbert konnte dies zur damaligen Zeit natürlich noch nicht wissen. Er spekulierte wie folgt, dass die Zeit, die das Eisenteil dem Erdmagnetfeld ausgesetzt war, für die Magnetisierung verantwortlich sei: *"durch die Biegung seiner Enden zu den Polen, für eine so lange Zeit."*[STER01a]

Außerdem beobachtet William Gilbert, dass Eisen beim Schmieden magnetische Eigenschaften gewinnen konnte. Er notierte:

"Denn als wenn ein Kind aus seiner Mutter Schoß ans Tageslicht gebracht wird und die Atmung erhält und einige andere Lebensäußerungen.... so wird das Stück Eisen ... wenn es von seinem erhitzten Zustand zu seiner vorherigen Temperatur zurückkehrte, mit einer gewissen Vertizität erfüllt, je nach seiner Lage."[STER01a]

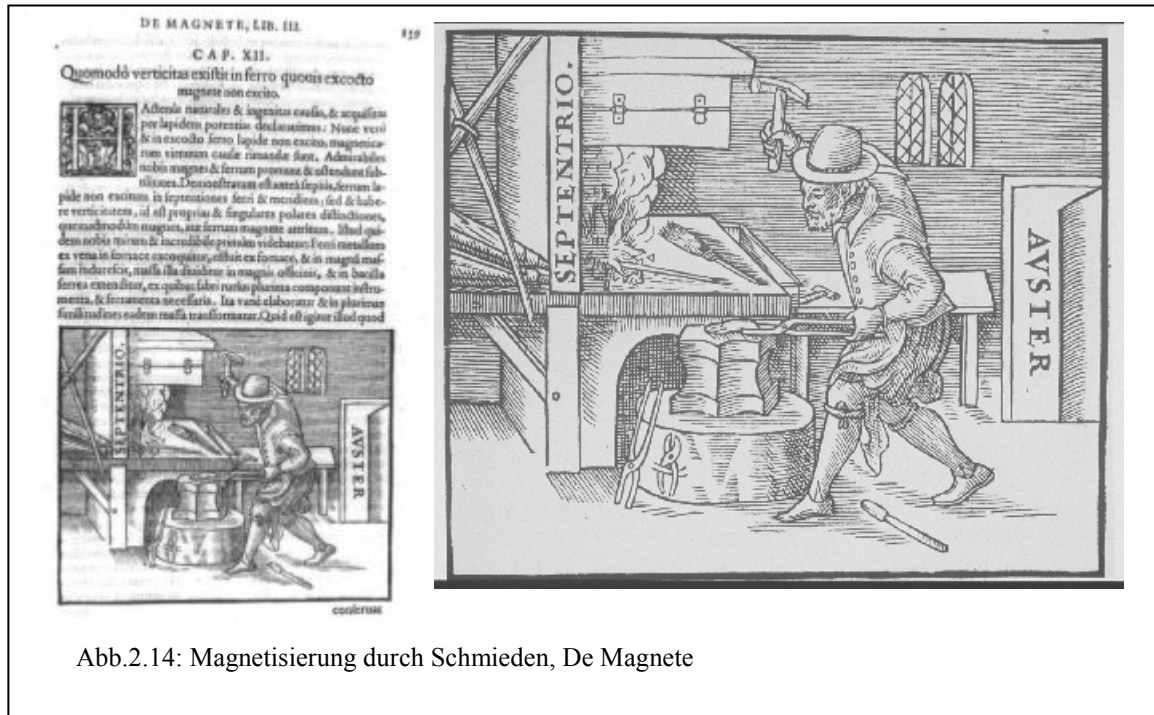


Abb.2.14: Magnetisierung durch Schmieden, De Magnete

"Vertizität" bedeutet hier Magnetisierung. Gilbert beschreibt so die Tatsache, dass Eisen oberhalb des Curie-Punktes seine Magnetisierung verliert, und beim Abkühlen unterhalb dieser Temperatur die Magnetisierungsrichtung seiner Umgebung annimmt, z.B. die des Erdmagnetfeldes.

Aufgrund dieser großartigen Leistungen wird William Gilbert heute zu Recht als **Vater des Magnetismus** bezeichnet.

Das Konzept des **Elementarmagneten** wurde als erstes vom italienischen Mathematiker und Schüler Galileis, Benedetto Castelli, geborener Antonio Castelli, im Jahre 1640 ausgearbeitet. Er lebte von 1578 bis 1643 und nahm den Namen "Benedetto" beim Betreten des Benediktiner-Ordens im Jahr 1595 an. In seinem Werk „Discorso sopra la calamita“ („Vortrag über den Magnet“) beschreibt Castelli, wie schwarzes Pulver (Elementarmagnete), welches damals zum Trocknen von Tinte benutzt wurde, auf einen Magneten reagieren, und somit das Prinzip des Elementarmagneten-Modells.

„If you take a piece of a magnet, and in crushing it reduce it to a powder—which is exactly what most of that black powder used here and Rome and elsewhere in Italy to dry wet ink on freshly written letters is composed of—and you place the powder on top of a piece of paper, and underneath it a magnet, when you touch the paper with the magnet, or draw it near to it, right away that powder will organize itself in something like filaments, and if you turn the magnet to its opposite pole and approach the paper again those filaments will rise perpendicularly above the paper...“ [CAST83]

An anderer Stelle in Castellis Werk (S.553) wird seine Faszination und Begeisterung für das magnetische Verhalten der Elementarmagnete besonders deutlich:

„There is thus a curious mutism in a treatise so insistent on the magnet’s ability to comunicare la virtù ad altri corpi, “to communicate its powers to other bodies,” as if that soulless stone could somehow do what this very accomplished scholar and teacher could not.“ [CAST83]

Nach dem Elementarmagneten-Modell wurde die nächste, wirklich fundamentale Neuentdeckung vom (bis dahin wenig bekannten) dänischen Physiker und Professor der Naturwissenschaften der Universität Kopenhagen, Hans Christian Ørsted (1777-1851), im Jahre 1820 gemacht. Als er in seinem Haus eine wissenschaftliche Vorführung für einige Freunde und Studenten vorbereitete, hatte er neben den Utensilien zur Demonstration der Erwärmung eines Drahtes durch Strom auch einen Kompass bereitgestellt, um einige magnetische Experimente zu zeigen.



Abb.2.15: Ørsteds Beobachtung [STER01d]

Während der Durchführung seiner elektrischen Versuche beobachtete er zu seiner Überraschung, dass die Kompassnadel, die auf dem Tisch lag, jedes Mal ausschlug, wenn der Stromkreis geschlossen wurde. (Als Stromquelle diente die zwischen Ørsted und seinem Gehilfen sichtbare Voltasche Säule, die von Alessandro Volta im Jahre 1800 erfundene elektrochemische Batterie.) Ørsted schwieg, beendete die Vorführung, und suchte nach einer Erklärung für dieses neue Phänomen.

Da er jedoch keine fand, veröffentlichte er schließlich einfach seine Beobachtung, dass eine Magnethnadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters senkrecht abgelenkt wird. Abbildung 2.16 zeigt, wie Ørsted seinen Versuch durchführt. [STER01d] Mit Ørsteds Experiment war so der Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität, der vor allem von den deutschen Physikern aus dem Romantikerkreis (denen Ørsted sehr nahe stand) seit langem vermutet wurde, zum ersten Mal eindeutig nachgewiesen worden.



Abb.2.16: Ørsteds Versuch

Es begann eine neue Epoche in der Geschichte des Magnetismus, der Elektromagnetismus, und Ørsted war ihr Begründer.

Ørsteds Versuch sprach sich herum, und kurz nachdem André Marie Ampère (1775-1836) in Frankreich davon gehört hatte, erkannte er, dass *zwei* parallele stromdurchflossene Leiter eine Anziehungskraft, und antiparallele eine Abstoßungskraft aufeinander ausüben. Er forschte weiter und veröffentlichte fünf Jahre später seine Ergebnisse zum Magnetismus. Am bekanntesten ist die nach ihm benannte Einheit der Stromgröße 1 Ampere, die über die Kraft zwischen zwei Strom durchflossenen Leitern definiert ist. [KRIE99]

Als nächstens machte Michael Faraday (1791-1867), ein britischer Physiker und Chemiker, sich einen Namen wegen seiner Entdeckungen auf dem Gebiet des Elektromagnetismus. 1831 fand er mit einer Anordnung, dem heutigen Transformator, den Effekt der elektromagnetischen Induktion. [KLOS94]

Drei Jahre später entdeckte er die Selbstinduktion. Ebenso stellte er weitere vier Jahre später die Analogie von induziertem Magnetismus in magnetischen Materialien und induzierter Elektrizität in Isolatoren fest. 1845 wies er die Existenz des Diamagnetismus nach, und 1846 fand er heraus, dass ein starkes Magnetfeld die Polarisationssebene des Lichtes in Glas drehen kann.

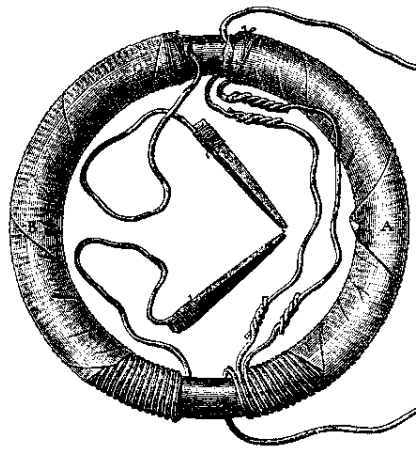


Abb.2.17: Faradays Transformatorspule zum Nachweis des Induktion (1831) [KLOS94]

Interessant dabei ist, dass Faraday keinerlei mathematischen Kenntnisse besaß. Er zog als anschauliches Hilfsmittel zur Beschreibung seiner Versuchsergebnisse lediglich die magnetischen Kraftlinien heran. Obwohl sie für ihn zunächst nur eine Veranschaulichung waren, war er später davon überzeugt, dass sie eine physikalische Realität besitzen. So prägte Faraday - gegen den Widerstand der meisten Fachkollegen - den Begriff des magnetischen und elektrischen Kraftfeldes. [HERM78]

Der schottische Mathematiker und Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) brachte die mathematische Erklärung für den von Faraday eingeführten physikalischen Kraftlinienbegriff auf eine sehr umfassende Gestalt. Er fasste alle elektromagnetischen Phänomene in den nach ihm benannten vier Gleichungen, den Maxwell – Gleichungen, zusammen. [HERM78]

Diese, 1862 erstmals von ihm in vollständiger Form publizierten Gleichungen, sind von einer solchen Genialität, dass sie sogar die spätere physikalische Revolution der Physik durch Einsteins Relativitätstheorie unverändert überstanden haben.

Sie demonstrieren die tiefe Verbindung der elektrischen und magnetischen Felder und bringen dabei die Lichtgeschwindigkeit mit ins Spiel, die auch für Einsteins Relativitätstheorie später eine bedeutende Rolle spielte.

3. Kapitel

Magnetismus heute - ein Überblick

3.1 Einführung

Nach diesem historischen Überblick über die jeweiligen Kenntnisse zum Magnetismus wird nun eine Übersicht über die aktuellen Grundlagentheorien zum Magnetismus geben, insbesondere über den Paramagnetismus, den Diamagnetismus und den Ferromagnetismus. Dabei wird schwerpunktmäßig auf den Ferromagnetismus eingegangen, da er eine wichtige physikalische Grundlage dieser Dissertation bildet.

In der Schulphysik der Unter- und Mittelstufe und der Alltagserfahrung der Schüler werden nur ferromagnetische Stoffe betrachtet und untersucht. Dabei lernen die Schüler, dass ausschließlich die drei Metalle Eisen, Nickel und Kobalt magnetische Eigenschaften aufweisen. Erst in der Oberstufe wird am Rande erwähnt, dass auch para- und diamagnetische Stoffe existieren.

Daher klassifizieren Schüler Stoffe umgangssprachlich nur als „magnetische“ oder „unmagnetische“ Stoffe. Ferromagnetische Stoffe wären ihrer Definition nach magnetisch, und para- und diamagnetische Stoffe unmagnetisch.

klassischen Physik erklären lassen, sondern dass es quantenmechanische Phänomene sind. Dies haben Bohr und Van Leeuwen unabhängig voneinander in ihren Dissertationen 1911 und 1919 bewiesen. Das so genannte Bohr-Van Leeuwen-Theorem laute:

„Bei endlichen Temperaturen und in allen endlichen elektrischen oder thermischen Feldern ist die Nettomagnetisierung eines Ensembles von Elektronen im thermischen Gleichgewicht identisch Null.“ [OPEL05]

Ein Unterscheidungskriterium zwischen den verschiedenen Phänomenen ist das Verhalten der entsprechenden Materien beim Einfügen in ein äußeres Magnetfeld \mathbf{H} . Der im Vakuum geltende lineare Zusammenhang $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$ zwischen der magnetischen Flussdichte \mathbf{B} und der von außen angelegten magnetischen Feldstärke \mathbf{H} mittels der Permeabilität im Vakuum μ_0 wird durch die Materie verändert. [BERG92]

Die verschiedenen Stoffe erfahren eine unterschiedliche Magnetisierung \mathbf{M} , die im Gegensatz zur magnetischen Feldstärke \mathbf{H} nicht auf makroskopische Ursachen wie Stromquellen beruht, sondern auf mikroskopischen, nämlich auf orbitalen Strömen in Atomen und Molekülen und Spins von Elektronen. Die Magnetisierung lässt sich vereinfacht als Vielfaches der externen magnetischen Feldstärke \mathbf{H} beschreiben. Der Proportionalitätsfaktor χ , die Suszeptibilität, entspricht allgemein einem Tensor zweiter Stufe. Hier wird jedoch nur der lineare Zusammenhang betrachtet. Für die magnetische Flussdichte in Materie gilt die Formel: $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$

Die Zahl μ_r ist die Permeabilitätszahl in Materie. Ist ihr Wert kleiner als 1, so ist der Stoff diamagnetisch, ist er größer als 1, so ist er paramagnetisch, und ist er wesentlich größer als 1, so ist er ferromagnetisch. [BERG92]

Die Ursache für die verschiedenen Magnetisierungen und Permeabilitätszahlen sind die jeweils auf bestimmte Weise angeordneten und wechselwirkenden magnetischen Momente in den Stoffen.

Jedes Atom hat gemäß seinem Aufbau aus der Elektronenhülle und dem Kern ein Hüllenmoment und ein Kernmoment. Das Hüllenmoment setzt sich aus dem Bahnmoment und dem Spinnmoment zusammen. Das Kernmoment weist einen viel schwächeren Beitrag als das Hüllenmoment auf und kann daher im Verhältnis vernachlässigt werden. [MAYE85]

„Für die Spinmomente ist es energetisch am günstigsten, wenn sie sich parallel zum Magnetfeld \mathbf{H} einstellen“ und es so verstärken. „Die Bahnmomente hingegen werden beim Anlegen eines Magnetfeldes geschwächt, da die auf den Orbitalen umlaufenden Elektronen durch das Magnetfeld wie im Falle von Leiterschleifen so beeinflusst werden, dass entsprechend der Lenzschen Regel mikroskopische Ströme induziert werden, die das äußere Feld schwächen.“ [BERG92]

Der Diamagnetismus beruht daher hauptsächlich auf den Bahnmomenten, der Para- und Ferromagnetismus auf den Spinmomenten.

3.2 Diamagnetismus

Diamagnetische Stoffe besitzen keine permanenten magnetischen Momente. Ihre Elektronenschalen sind entweder abgeschlossen, und daher ohne resultierendes magnetisches Moment, oder besitzen nur gepaarte Elektronen, so dass sich folglich ihre Spinmomente gegenseitig kompensieren.

Halbklassisch wird der Diamagnetismus häufig als Induktionseffekt beschrieben. Das äußere Magnetfeld verursacht eine Präzession des Drehimpulsvektors der Elektronenbahn (Larmor-Präzession), die nach der Lenzschen Regel dem äußeren Feld entgegengerichtet ist und somit seine abstoßende Wirkung hervorruft.

Der Diamagnetismus (diametral griechisch: entgegengesetzt) ist eine generelle Eigenschaft jeder Materie⁴, da alle Stoffe mindestens in der Unterschale gepaarte Elektronen besitzen. Bei vielen Stoffen wird er jedoch durch den stärkeren Para- oder Ferromagnetismus überdeckt. Diamagnetische Eigenschaften treten bei fast allen organischen Substanzen auf, sowie bei einigen Metallen und Nichtmetallen.

⁴ z. B. Frösche sind diamagnetisch, mit ihnen lässt sich die diamagnetische Levitation durchführen. [HALL03]

3.3 Paramagnetismus

Paramagnetische Stoffe besitzen ebenso wie die ferromagnetischen Stoffe permanente magnetische Momente, da sie teilweise gefüllte Energieniveaus besitzen. Gewöhnliche paramagnetische Materialien zeigen aber erst beim Einfügen in ein äußeres Magnetfeld ein gesamt magnetisches Moment. Durch das äußere Magnetfeld werden die vorhandenen Spinmomente parallel zum äußeren Feld ausgerichtet, die sich sonst durch thermische Fluktuation statistisch verteilen. Zudem wird die Entstehung ungepaarter Elektronenspins durch Anheben von Elektronen in höhere Energieniveaus angeregt⁵, so dass die anziehende Wirkung durch Verstärkung des äußeren Magnetfeldes hervorgerufen wird.

Ferromagnetische, ferrimagnetische und antiferromagnetische Stoffe zeigen zudem über ihrer jeweiligen kritischen Temperatur ein paramagnetisches Verhalten. [BERG92]

3.4 Ferromagnetismus

Ferromagnetische Materialien zeichnen sich durch eine spontane Magnetisierung unterhalb der Curietemperatur aus. Bei Zimmertemperatur sind die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt ferromagnetisch, bei tieferen Temperaturen werden auch Metalle Seltenen Erden⁶ ferromagnetisch.

Die ferromagnetischen Stoffe lassen sich nach der Breite ihrer Hysteresekurve in magnetisch harte und weiche Stoffe einteilen. Die Hysteresekurve gibt die Größe der Magnetisierung M in Abhängigkeit von der Stärke des äußeren magnetischen Feldes H an.

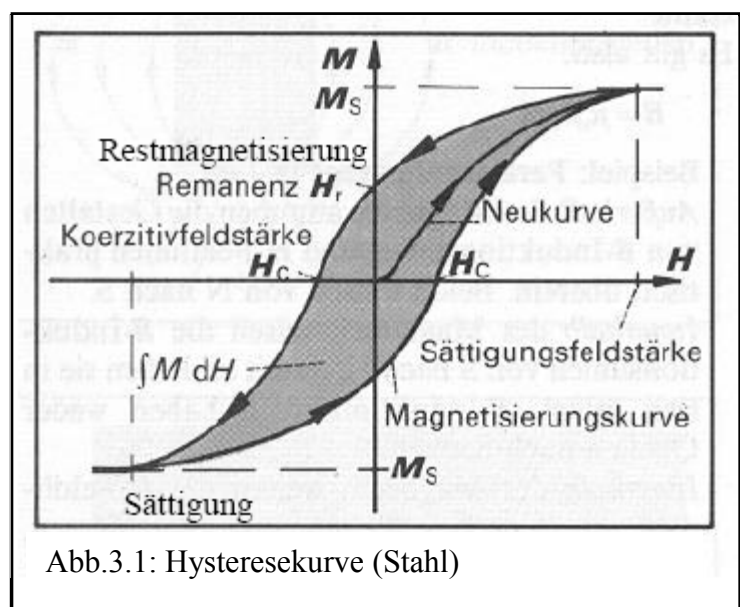


Abb.3.1: Hysteresekurve (Stahl)

⁵ unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips und der Hundschen Regel

⁶ Die *Seltenen Erden* werden oft auch *Lanthanoide* genannt. Sie sind entgegen ihrer missverständlichen Bezeichnung aus der Zeit der Entdeckung nicht selten.

Zu Beginn einer Magnetisierung (siehe Neukurve) sind sowohl die Magnetisierung des Stoffes als auch die Feldstärke des Magnetfeldes Null. Wird \mathbf{H} erhöht, so steigt \mathbf{M} nichtlinear bis zur Sättigungsmagnetisierung \mathbf{M}_s an. Wird das äußere Magnetfeld wieder auf Null gesenkt, geht \mathbf{M} nicht auf Null zurück, sondern behält eine Restmagnetisierung (Remanenz) bei. Zur vollständigen Entmagnetisierung des Stoffes muss ein der Magnetisierungsrichtung entgegengesetztes Magnetfeld \mathbf{H} mit der Koerzitivfeldstärke \mathbf{H}_C aufgebaut werden. Ein weiteres betragsmäßiges Vergrößern der Feldstärke führt zur Sättigungsmagnetisierung in entgegengesetzter Richtung. Das weitere Durchlaufen der Magnetisierungskurve verläuft analog. [BERG92]

Die von einem *Hysteresekyklus* eingeschlossene Fläche $\int M dH$ gibt die hineingesteckte Energie an. Bei engen Hysteresekurven ist der Energieverlust geringer; diese magnetisch weichen Stoffe werden bevorzugt in Motoren und Transformatoren verwendet. Magnetisch harte Stoffe werden hingegen bei der Produktion von Permanentmagneten bevorzugt.

Um das Phänomen des Ferromagnetismus zu erklären, gibt es verschiedene wissenschaftliche Modelle, die im Weiteren dargestellt werden.

Die Ursache für diese irreversible Magnetisierung lässt sich mit dem **Modell** der **Weiss'schen Bezirke** und der **Barkhausen-Sprünge** erklären. Weiss'sche Bezirke sind Bereiche in ferromagnetischen Stoffen, in denen die Spins der Elektronen⁷ parallel zueinander ausgerichtet sind. Die verschiedenen Weiss'schen Bezirke sind durch die sogenannten Bloch-Wände voneinander getrennt, in ihnen vollzieht sich ein stetiger Übergang der Magnetisierungsrichtung.

Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes wachsen die Weiss'schen Bezirke, deren Magnetisierungsrichtung am ehesten der des Magnetfeldes entspricht, indem die Spins der Elektronen in den anderen Bezirken „umklappen“. Anschaulich entspricht dies einem Verschieben der Bloch-Wände.

⁷ Die Spins der Elektronen lassen sich in diesem Modell als Elementarmagneten auffassen.

Würde das Verschieben der Bloch-Wände gleichmäßig verlaufen, wäre die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe reversibel und es gäbe keine Hysteresekurve. Aber Störstellen, die in jedem ferromagnetischen Stoff⁸ existieren, verhindern das gleichmäßige Verschieben. Trifft nämlich eine Bloch-Wand beim Verschieben auf eine Störstelle, so bleibt sie zuerst an dieser Stelle an ihr hängen und es bildet sich hinter der Störstelle eine Art Blase, in der sich trotz weiterer Erhöhung des äußeren Magnetfeldes die Spins der Elektronen nicht umklappen. Erst ab einer bestimmten Feldstärke schließt sich diese Blase. Diese plötzlichen Änderung der Magnetisierung, der so genannte Barkhausen-Sprung, ist der Grund für das Entstehen der Hysteresekurve. Wenn alle Elektronenspins ausgerichtet sind, ist die Sättigung erreicht.

Eine *quantenphysikalische* Erklärung für das Phänomen des Ferromagnetismus ermöglicht das Modell des **Heisenbergschen Austauschintegrals**. Nach dem Pauli-Prinzip dürfen zwei Elektronen desselben Atoms nicht in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen, das bedeutet, sie haben entweder parallele Spins, aber verschiedene Drehimpulsquantenzahlen, oder aber sie besitzen einen antiparallelen Spin aber die gleichen Orbits.

Welche dieser beiden Möglichkeiten eintritt, hängt von der dafür benötigten Energie ab, angestrebt wird jeweils die Energieoptimierung bzw. –minimierung. Im Fall der parallelen Spins wird ein Elektron in ein höheres energetisches Niveau gehoben, dies wirkt sich negativ auf die Energieminimierung aus, hingegen wirkt sich die Tatsache der parallelen Spins positiv auf die Coulomb-Energie aus. Die Gesamtenergie paralleler Spins wird mit $E^{\uparrow\uparrow}$ bezeichnet. Andersherum wird bei einer antiparallelen Spinanordnung die Coulomb-Energie erhöht, aber die Energie für ein höheres Niveau eingespart. Hierbei wird die Gesamtenergie mit $E^{\uparrow\downarrow}$ bezeichnet.

Das Heisenbergsche Austauschintegral J_{ij} lässt sich über die Spins $S_{i,j}$ der wechselwirkenden Elektronen mit dem Hamiltonoperator H_A beschreiben: $H_A = \sum_i \sum_j J_{ij} S_i S_j$

⁸ Bei Eisen bilden z.B. die Kohlenstoffeinflüsse die Störstellen.

Es kann für die meisten Fälle jedoch nur schwer berechnet werden, mathematisch lässt es sich aber als Energiedifferenz zwischen der parallelen und der antiparallelen Spinaufstellung deuten. $|E^{\uparrow\uparrow}| - |E^{\uparrow\downarrow}| = J_{ij}$

Ist $J_{ij} < 0$, so stellen sich die Spins antiparallel (siehe Antiferromagnetismus) ein, ist hingegen $J_{ij} > 0$, so erwartet man eine parallele Spinausrichtung, und es handelt sich um einen Ferromagneten. [STAU89]

Ein anderes Modell zur Beschreibung des Ferromagnetismus ist das **Ising-Modell** nach einer Idee von Lenz im Jahr 1925. Mit ihm lässt sich am Computer die Magnetisierung von Ferromagnetika⁹ in Abhängigkeit von der Temperatur simulieren. In dem Modell wird angenommen, dass die das magnetische Moment bestimmenden Spins nur zwei diskrete Zustände annehmen können (*spin up* oder *spin down*). Zu Anfang wird jeder Spin mit der Wahrscheinlichkeit p zufällig orientiert auf einen Gitterplatz eines Quadratgitters (in 2 Dimensionen) oder eines Würfelgitters (in 3 Dimensionen) gesetzt. Ein Spin klappt in diesem Modell dann und nur dann um, wenn seine vier bzw. sechs direkten Nachbarn ebenso viele *spins up* wie *spins down* aufweisen, denn dann bleibt die Energie beim Umklappen erhalten. [STAU89]

Je nach eingeegebener Wahrscheinlichkeit p lassen sich Aussagen über die entsprechende Temperatur und die zugehörige Magnetisierung machen.

Bei $p=0$ oder $p=1$ sind alle Spins immer parallel, dies entspricht ganz tiefen Temperaturen. Für einen konkreten Wahrscheinlichkeitswert p ist der Curiepunkt erreicht, bei größeren Wahrscheinlichkeiten (höhere Temperaturen) geht die Magnetisierung¹⁰ langsam auf Null zu, bei kleineren Wahrscheinlichkeiten (niedrigere Temperaturen) bleibt die Magnetisierung bei einem endlichen Wert, eben bei der spontanen Magnetisierung. [STAU89]

⁹ und Paramagnetika

¹⁰ Paramagnetismus

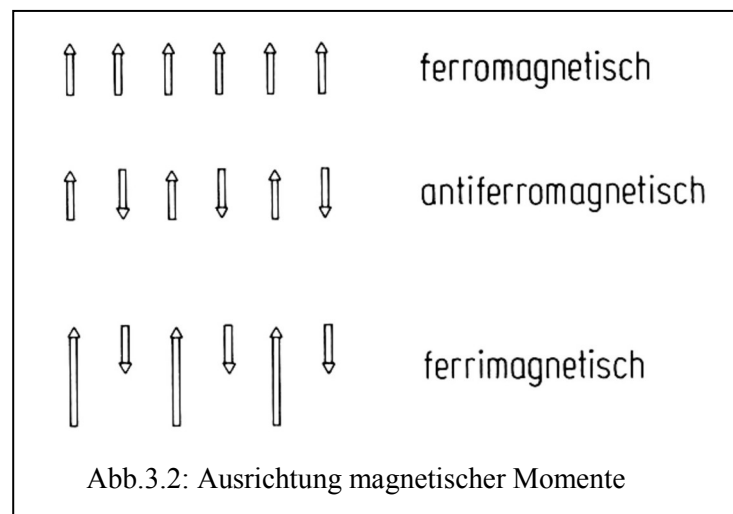
Das **Hubbard-Modell** ist ein mikroskopisches Modell zur Untersuchung korrelierter Elektronensysteme. Es wurde 1963 in der Hoffnung eingeführt, mit seiner Hilfe die Ursachen des Ferromagnetismus mikroskopisch zu verstehen. Tatsächlich bevorzugt das Modell in den meisten Gittern aber den Antiferromagnetismus. [VOLL05]

Es betrachtet die kinetische Energie und die Wechselwirkungsenergie der Elektronen unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips. Die Elektronen können von einem Gitterplatz zum nächsten springen, aber an einem Gitterplatz dürfen nur zwei Elektronen mit antiparallelem Spin sitzen. Die Coulombabstoßung wird nur zwischen Elektronen betrachtet, die sich am selben Gitterplatz befinden. Die Gesamtenergie setzt sich additiv aus der kinetischen Energie und der Coulombwechselwirkungsenergie zusammen. Für die Energieminimierung wäre es zum einen am günstigsten, wenn es keine Plätze mit antiparallelen Spins (dem Ferromagnetismus entsprechend), und somit keinen Beitrag zur Wechselwirkung geben würde, zum anderen erhöht aber diese Einengung der Sprungmöglichkeiten die kinetische Energie aufgrund der nun größeren Sprungabstände. Zur Energieoptimierung müssen folglich auch Coulombwechselwirkungen zugelassen werden, aber die dabei auftretenden antiparallelen Spins ließen häufig nicht wie gewünscht den Ferromagnetismus, sondern den Antiferromagnetismus, nachweisen. [VOLL05]

3.5 Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus

Der Antiferromagnetismus lässt sich, wie oben bereits angedeutet, mit dem Heisenbergschen Austauschintegral J_{ij} erklären. Antiferromagnetika zeichnen sich nämlich durch eine antiparallele Spinaufstellung aus, und diese liegt gerade für $J_{ij} < 0$ vor, da dabei die Energieoptimierung bei der antiparallelen Spinausrichtung eintritt.

Antiferromagnetische Stoffe zeigen ihre Eigenschaft unterhalb der Néel-Temperatur, oberhalb dieser Temperatur ist ihr Verhalten paramagnetisch. Die einfachen Oxide der ferromagnetischen Elemente sind antiferromagnetisch.



Beim Ferrimagnetismus ist die Ausrichtung der magnetischen Momente zwar antiparallel, jedoch sind diese in einer Orientierung stärker, so dass sie das gleiche Verhalten wie Ferromagnete zeigen, jedoch in verstärkter Form. Der Magnetstein Magnetit, Ferrite und Eisengranate gehören in diese Kategorie. Ebenso wie die anderen kooperativen magnetischen Phänomene lässt sich der Ferrimagnetismus mit der Austauschwechselwirkung erklären.

3.6 Anwendungen des Magnetismus

Die Anwendung des Magnetismus, und insbesondere des Elektromagnetismus, ist aus unserem heutigen Alltag überhaupt nicht mehr wegzudenken. Der Magnetismus ist in vielen Alltagsgegenständen und Technologien, die wir täglich benutzen, verborgen. Im Folgenden wird ein kleiner Überblick über die verschiedensten Anwendungsbereiche des Magnetismus gegeben.

Viele Datenspeichermedien wie beispielsweise die Festplatte oder die Diskette, die Musik- oder Videokassette sowie ec-Karten mit Magnetstreifen beruhen auf einer magnetischen Speicherung von Daten. Diese Speichermedien bestehen aus einem magnetisierbarem Material, dessen einzelne Sektoren mittels eines Schreib-/ Lesekopfes, prinzipiell ein kleiner Elektromagnet, gezielt magnetisiert werden. Das Medium kann entsprechend der Magnetisierung so die Werte *spin up* oder *spin down* (0 und 1) annehmen. Der Lesekopf liest die Information dann über den Flusswechsel, die Änderung der Magnetisierungsrichtung, wieder aus.

Ein anderer großer magnetischer Anwendungsbereich beruht auf dem Prinzip der Induktion. Dabei wird Spannung entweder auf Grund von Änderung der magnetischen Flussdichte oder der Änderung der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche induziert. Einige Beispiele dieses Phänomens sind die Induktionsschleifen vor Ampeln, Antennen für den Empfang elektromagnetischer Wellen, Generatoren, Transformatoren, Netzteile, Hochspannungsleitungen, Wirbelstrombremsen und Induktionsherde.

Auch das Prinzip der Selbstinduktion zählt zu den Anwendungen der Induktion. Voraussetzung ist eine sich ändernde Stromstärke in einem Leiter, welche eine Änderung des magnetischen Flusses verursacht, die ihrerseits im ursprünglichen Leiter eine Spannung induziert. Nach der Lenz'schen Regel wirkt die induzierte Spannung ihrer Ursache, dem Stromfluss, entgegen. Eine weit verbreitete Anwendung sind die Drosseln, die die erforderliche Zündspannung für Leuchtstofflampen erzeugen.

Ein weiteres magnetisches Anwendungsgebiet beruht auf der Steuerung geladener Teilchen durch magnetische Felder. Die schönen Naturschauspiele des Polarleuchtens lassen sich mit diesem Prinzip erklären, ebenso die Entstehung von Bildern auf der Braunschen Röhre beim Fernseher oder die Funktionsweise des Teilchenbeschleunigers.

Letztlich gibt es noch medizinische Anwendungen. Dazu zählt beispielsweise die Magnetfeldtherapie, eine alternativmedizinische Behandlungsmethode, bei der Menschen einem Magnetfeld ausgesetzt werden oder auch die Kernspin-Tomographie (auch Magnet-Resonanz-Tomographie genannt). Die Kernspin-Tomographie beruht darauf, dass die Kernspins in Abhängigkeit von ihrem Ort und Gewebetyp durch gezieltes Zu- und Abschalten von Magnetfeldern unterschiedliche Spannungen induzieren, die Aussagen über die zugrunde liegende Gewebestruktur ermöglichen.

4. Kapitel

Magnetismus im Physikunterricht – das Elementarmagneten-Modell

4.1 Blick auf das Curriculum

In diesem Kapitel soll dargestellt werden, in welchen Jahrgangsstufen und mit welchen Schwerpunkten das Thema Magnetismus nach den Richtlinien und Lehrplänen für Gymnasien in NRW¹¹ unterrichtet werden soll.

Der Physikunterricht am Gymnasium beginnt in der Regel in der Klasse 6. Der Magnetismus ist dort jedoch als „eigenständiges Sachgebiet nicht mehr vorgesehen. Im Rahmen der Elektrizitätslehre werden jedoch einige Phänomene des Magnetismus behandelt.“ [KULT93] Als Argument dieser Einbettung werden „Zeitgründe“ benannt.

Übersicht der Sachgebiete für die Jahrgangsstufe 6

„B. Elektrischer Strom

B.1 Stromkreise

B.2 Leiter und Isolatoren

B.3 Die Fahrradbeleuchtung

B.4 Dauermagnete und Elektromagnete

B.5 Nennspannungen von elektrischen Quellen und Verbrauchern

B.6 Wärmewirkung des elektrischen Stroms; Sicherung

B.7 Elektrischer Strom und Energie; Energiewandler

B.8 Elektrische Geräte mit Thermostat“ [KULT93]

¹¹ Die Lehrpläne sind momentan im Umbruch, die Arbeit kann natürlich nur den zur Zeit aktuellen Stand wiedergeben.

Zur Spezifizierung des Sachgebietes B.4 lautet es weiter:

„B.4 Dauermagnete und Elektromagnete

Es wird erwartet, dass die Schülerinnen und Schüler

- wissen, dass Stabmagnete und stromdurchflossene Spulen Eisen anziehen;
 - feststellen können, wo Nord- und Südpol eines Stabmagneten sind;
 - beschreiben können, wie zwei Magnete aufeinander wirken;
 - wissen, dass die magnetische Wirkung der Spule durch Eisenkerne erheblich verstärkt wird;
 - eine stromdurchflossene Spule als schaltbaren, umpolbaren und in der Stärke veränderbaren Magneten benutzen können;
 - technische Anwendungen von Elektromagneten angeben und erklären können.“
- [KULT93]

In der Klasse 7 wird häufig kein Physikunterricht erteilt, aber wieder in der Jahrgangsstufe 8. Dort werden im Sachgebiet „Elektrizität“ unter A.1 magnetische Wirkungen unter „Wirkungen des elektrischen Stromes“ spiralförmig wieder aufgegriffen.

„A. Elektrizität

A.1 Wirkungen des elektrischen Stromes

- A.2 Elektrische Ladungen
- A.3 Stromstärke und Ladung
- A.4 Die elektrische Quelle
- A.5 Der elektrische Verbraucher“ [KULT93]

Zur Spezifizierung von A.1 heißt es:

„A.1 Wirkungen des elektrischen Stromes

Es wird erwartet, dass die Schülerinnen und Schüler

- (...)
- die magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters sowie einer stromdurchflossenen Spule experimentell nachweisen können;
- technische Anwendungen der magnetischen Wirkung angeben können;
- (...).“ [KULT93]

Im didaktischen Kommentar lautet es:

„Die magnetische Stromwirkung sollte experimentell als Kraftwirkung auf eine Magnetnadel untersucht werden. Bei der stromdurchflossenen Spule sollte zudem die Analogie zum Stabmagneten hergestellt werden.“ [KULT93]

In den Jahrgangsstufen 9 und 10 wird ebenfalls Physikunterricht erteilt, die Sachgebiete für diese beiden Klassen werden von den „Richtlinien und Lehrplänen – Physik“ gemeinsam angegeben. Unter **E. Elektrische Energie** wird wieder Bezug auf den Magnetismus genommen.

„E. Elektrische Energie

- E.1 Elektrische Energie und Leistung; Definition der Spannung
- E.2 Verzweigte und unverzweigte Stromkreise
- E.3 Elektromotor und Generator
- E.4 Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie“ [KULT93]

Zur Spezifizierung von E.3 heißt es:

„E.3 Elektromotor und Generatoren

Es wird erwartet, dass die Schülerinnen und Schüler

- den Aufbau des Gleichstrommotors beschreiben und seine Funktionsweise auf die Kraft, die eine stromdurchflossene Spule im Magnetfeld erfährt, zurückzuweisen können;
- den Aufbau des Wechselstromgenerators beschreiben können und wissen, dass durch Drehung der Spule im Magnetfeld ein Strom erzeugt wird.
- (...)“ ...[KULT93]

Im Didaktischen Kommentar dazu lautete es:

„Angesichts der technischen Relevanz von Elektromotor, Generator und Braunscher Röhre bietet sich eine vertiefte Behandlung des Elektromagnetismus im Rahmen der unterrichtlichen Freiräume an. Dabei können die obligatorischen Inhalte zum einen durch die Betrachtung der Lorentzkraft und zum anderen in Richtung auf die technischen Anwendungen erweitert werden.“ [KULT93]

Bis zum Ende der Sekundarstufe I nach der 10. Klasse ist der Physikunterricht obligatorisch. In der Sekundarstufe II ist Physik ein Wahlwach, für das man sich alternativ zu anderen Naturwissenschaften entscheiden kann, aber nicht muss.

In der Jahrgangsstufe 11 wird thematisch das Großthema Magnetismus nicht tangiert. Gemäß dem Spiralcurriculums ist dies aber in der Jahrgangsstufe 12 der Fall. Unter der Überschrift „Elektrik“ soll das „magnetische Feld“, die „magnetische Feldgröße B “, die „magnetische Feldkonstante“, der „Ferromagnetismus“, die „Permeabilität“ und die „Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern“ [MINI99] erarbeitet werden.

Und ebenso wird in der Jahrgangsstufe 12 im Rahmen des „Elektromagnetismus“ noch die „elektromagnetische Induktion“ und „die Selbstinduktion und das Magnetfeld als Träger von Energie“ [MINI99] spiralförmig behandelt.

In der Jahrgangsstufe 13 können magnetische Aspekte im Rahmen der Atom- und Quantenphysik wieder aufgegriffen werden, hierbei handelt es sich nicht um obligatorische, sondern um empfohlene thematische Gegenstände. Zu nennen wäre hier, im Zusammenhang mit dem Pauli-Prinzip und dem Aufbau des Periodensystems der „Spin“. [MINI99]

Wie im nächsten Kapiteln erläutert wird, ist gerade die Grundlage, die Basis eines Wissens, von besonderer Wichtigkeit. Denn die Schüler adaptieren neue Phänomene und Gegenstände, in dem sie diese an vorhandene Strukturen und Sachverhalte anknüpfen. Dieses vernetzende Anknüpfen kann nur sinnvoll gelingen, wenn die Grundlage im Sinne Max Wertheimers produktiv bedacht, und sinnstiftend individuell erschlossen wird. Zudem belegen wissenschaftliche Forschungen zu den mentalen Modellen (vgl. Kapitel 5.4.1) und Analysen im Schulunterricht der Jahrgangsstufe 6 (siehe Kapitel 8.1), dass häufig eine Durchmischung und Gleichsetzung beispielsweise von + Pol und – Pol, sowie Nord- und Südpol, entsteht.

Insofern liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Elementarmagneten-Modell, da es die Wissensbasis zum Thema des Magnetismus in der Schule darstellt.

Auf dieses Modell und seine theoretischen Grundlagen lässt sich - parallel zum Aufbau des Curriculums – spiralförmig an bestimmten thematischen Stellen immer wieder zurückgreifen. Nicht nur als Wiederholung, sondern auch als Vertiefung und zum besseren Verständnis hilft es, aufbauende Phänomene wie beispielsweise den Ferromagnetismus und die Permeabilität zu erschleien. Warum verstärkt ein Eisenkern zum Beispiel das Magnetfeld einer Spule?

Das Elementarmagneten-Modell steht im Zentrum der fachdidaktischen Analyse, mit dem Ziel, es möglichst Sinn stiftend und eine positive Lernerfahrung bei den Schülern erschaffend, im Unterricht zu behandeln. Das Elementarmagneten-Modell, in seinen klassischen Varianten, wird nun vorgestellt.

4.2 Das „klassische“ Elementarmagneten-Modell und seine Ziele

Hier wird das Elementarmagneten-Modell, wie es in Schulbüchern aufzufinden ist und in Werken zur Didaktik und Praxis der Schulphysik dargestellt wird, als „klassisch“ bezeichnet, um es sprachlich gegenüber dem von mir entwickelten alternativen Modell abzugrenzen.

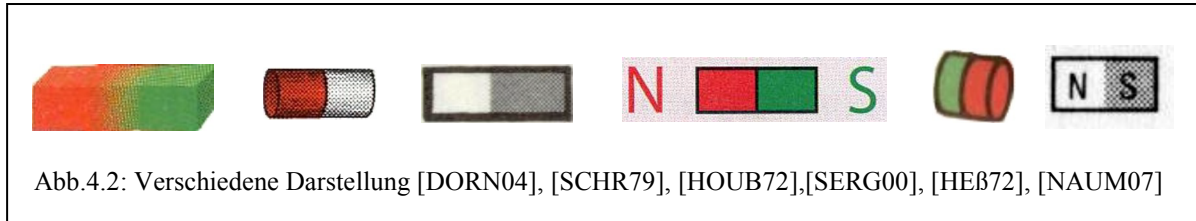
Der Ursprung des klassischen Modells lässt sich trotz intensiver Recherche nicht genau bestimmen. Dass es jedoch heute in vielfältigen Schulbüchern, Zeitschriften, Didaktikbüchern und kompakten Lexiken zur Physik aufzufinden ist, lässt sich nach [HUND72] leicht erklären. Er schreibt: „Als Physiker wissen wir“, wenigstens aus der jüngsten Geschichte, dass die wichtigen und grundlegenden Erkenntnisse nur bei ihrem Entstehen ausführlicher diskutiert werden; nachher werden sie mehr oder weniger geglaubt oder als selbstverständlich ohne Bedenken gehandhabt. Man lernt ja Physik meist aus einem Lehrbuch, das auf kurzem Weg das für das richtig gehaltene Wissen plausibel macht oder nur systematisch darstellt. Der Leser gewöhnt sich so an die Begriffe und Sätze. Wie die Menschen sich daran gewöhnt haben, dass die Erde um die Sonne läuft oder dass der Mensch aus einer tierischen Entwicklungsreihe hervorgegangen ist, so haben sich die Physiker daran gewöhnt, dass das Licht auf elektromagnetischen Wellen beruht ... Die Gründe dafür, die Zweifel daran und viele Schwierigkeiten, die eine solche Vorstellung bot, werden nicht mehr diskutiert. So werden auch die grundlegenden Begriffe der Physik nicht mehr voll verstanden.“

So liegt die Spekulation nahe, dass dieses klassische Modell, nachdem es einmal entwickelt wurde, so bis heute ins 21. Jahrhundert übernommen wurde.

Der zentrale Begriff beim Elementarmagneten-Modell ist, wie der Name schon sagt, der „Elementarmagnet“.

Je nach Adressatengruppe und didaktischem Zielanspruch wird der Elementarmagnet durch verschiedene Veranschaulichungen oder Experimente letztlich als ein Magnet dargestellt, den man nicht mehr teilen kann. Dieser unteilbare, sehr kleine Magnet, wird in den verschiedenen Quellen immer in Stabform dargestellt.

Die Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über verschiedene visuelle Darstellungen des Elementarmagneten.



Die prinzipielle Grundidee des Elementarmagneten-Modells beruht nun auf der Vorstellung, dass sich im Inneren ferromagnetischer Stoffe sehr viele dieser Elementarmagneten befinden, die sich ausrichten können.

Mittels des klassischen Elementarmagneten-Modells lassen sich die folgenden verschiedenen physikalischen Phänomene und Theorien erklären und plausibel machen.

1. Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe
2. Das charakteristische Verhalten beim Zerschneiden von Magneten
3. Die Magnetisierung aus der Distanz
4. Die Remanenz
5. Die Unmagnetisierbarkeit nicht-ferromagnetischer Stoffe
6. Die obere Grenze der Magnetisierbarkeit ferromagnetischer Stoffe

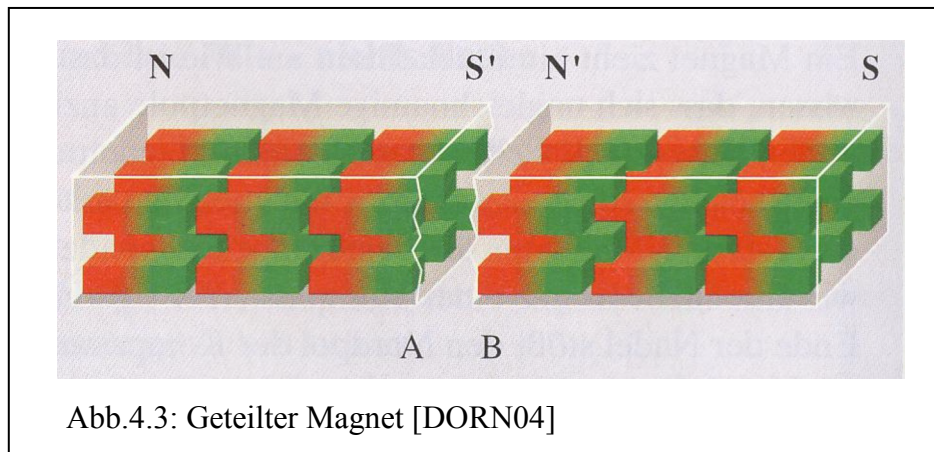
Zu 1. Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe

Im Inneren eines ferromagnetischen Stoffes, beispielsweise eines Stückes Eisen, befinden sich nach dem Elementarmagneten-Modell viele Elementarmagnete. Diese sind zunächst völlig ungeordnet positioniert. Wenn man jetzt das Stück Eisen in einer Richtung mit einem entsprechend starken Magneten überstreicht, zum Beispiel mit dem Nordpol, dann richten sich die Elementarmagnete mit ihrem Südpol in diese Streichrichtung aus. So sind an diesem Streichrichtungsende alle Elementarmagnete mit ihrem Südpole nach außen gerichtet. Dieses Ende bildet den Südpol des magnetisierten Eisenstücks. Am entgegengesetzten Ende bildet sich der Nordpol. Im mittleren Bereich des Eisenstückes schwächen sich die aufeinander folgenden Süd- und Nordpole in ihrer Wirkung nach außen ab.

Der ferromagnetische Stoff kann durch Erschütterung oder durch eine Temperaturerhöhung (über die Curietemperatur) entmagnetisiert werden. Dabei werden die Elementarmagnete im Modell aus ihrer angeordneten Struktur wieder in eine ungeordnete gebracht.

Zu 2. Das charakteristische Verhalten beim Zerschneiden von Magneten

Wenn ein Magnet geteilt wird, analog bei einem magnetisierten Stoff, dann entstehen zwei kleinere Magnete. Wiederholt man diesen Teilungsvorgang, so erhält man erneut weitere magnetische Dipole. Dieses Phänomen lässt sich auch mittels des klassischen Elementarmagneten-Modells erklären.



Wie in der Abbildung 4.3 dargestellt ist, kann man den Magneten nur zwischen aufeinander folgenden Elementarmagneten voneinander trennen, da die Elementarmagnete selber, ihrer Definition nach, ja unteilbar sind. So entstehen zwei neue Enden des Magneten; auf der einen Seite der Bruchstelle haben alle Elementarmagnete ihren Südpol und auf der anderen ihren Nordpol nach außen ausgerichtet. Würde man diese beiden Magnetenden wieder zusammen bringen, dann würde sich ihrer Wirkung nach außen wieder aufheben.

Zu 3. Die Magnetisierung aus der Distanz

Zur Erläuterung der Magnetisierung aus der Distanz wird exemplarisch ein Magnet betrachtet, an dessen Nordpol bereits mehrere Nägel aus Eisen in Form einer Kette hintereinander hängen. Nähert man diesem Gebilde nun einen weiteren Eisennagel, so wird er von dem untersten Nagel der „Nagelkette“ angezogen. Es erfolgt also für ihn eine Magnetisierung aus der Distanz. Zur Erklärung dieses Phänomens kann man auf obige

Erklärung unter „1. Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes“ zurückgreifen. Der oberste Eisennagel wird durch Ausrichten seiner Elementarmagnete auf Grund des Nordpols des Magneten selbst magnetisiert. Nun kann er somit induktiv selbst als Magnet aufgefasst werden, der die Elementarmagneten des nächsten Eisennagels ausrichtet. Diese Erklärung wird so weiter fortgesetzt bis zu dem letzten Nagel der Nagelkette. Dieser wirkt natürlich ebenso wie ein Magnet und richtet bei dem neu hinzukommenden Eisennagel die Elementarmagnete mit dem Südpol zum Nordpolende des letzten Nagels aus, so dass er angezogen wird.

Zu 4. Die Remanenz

Um das Phänomen der Remanenz zu erklären, wird das Beispiel unter 3., „die Nagelkette“, wieder aufgegriffen. Wenn man den Magneten von der Nagelkette entfernt, also die Ursache der Magnetisierung, kann trotzdem seine Wirkung noch fortauern, also die Nägelkette bestehen bleiben. Ob die Nägel weiter magnetisiert sind oder nicht, hängt neben der Temperatur unter anderem auch vom Material der Nägel ab. Hartmagnetische Stoffe behalten im Gegensatz zu weichmagnetischen Stoffe, wie beispielsweise Eisen, ihre Magnetisierung bei. Da man hartmagnetische Stoffe erhält, indem man Eisen mit Zusätzen von Aluminium, Nickel und Kobalt versieht, erklärt das Elementarmagneten-Modell die Remanenz damit, dass diese Zusätze das Ausrichten der Elementarmagnete behindern.

Je nach Quelle werden dabei nur unterschiedliche Beweglichkeiten der Elementarmagnete, oder auch verschiedene Größen der Elementarmagneten zur Erklärung herbeigezogen. Elementarmagnete in weichmagnetischen Stoffen sind demzufolge kleiner, und daher beweglicher, dargestellt als die in hartmagnetischen Stoffen. [HOUB72]

Zu 5. Die Unmagnetisierbarkeit nicht ferromagnetischer Stoffe

Eine entscheidende Frage beim Thema Magnetismus lautet, warum manche Stoffe von einem Magneten angezogen werden können und andere nicht. Diese spannende Frage lässt sich auch mittels des Elementarmagneten-Modells klären. Bei Stoffen, die sich nicht magnetisieren lassen, liegen die Elementarmagnete regellos durcheinander und sind kaum bis gar nicht beweglich. Daher kompensieren sie sich in ihrer Wirkung nach außen hin und werden nicht von dem Magneten angezogen, da sich kein entgegengesetzt magnetischer Pol an seiner Seite ausbildet.

Zu 6. Die Grenze der Magnetisierbarkeit ferromagnetischer Stoffe

Das Elementarmagneten-Modell erklärt auch, warum sich ein ferromagnetischer Körper nicht beliebig stark magnetisieren lässt. Wenn nämlich alle Elementarmagnete im ferromagnetischen Körper ausgerichtet sind, dann ist die magnetische Sättigung erreicht. Eine weitere Magnetisierung ist nicht möglich, da es keine weiteren Elementarmagnete im Körper mehr gibt und alle vorhandenen sich schon optimal ausgerichtet haben.

4.3 Zwei Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells

Das klassische Elementarmagneten-Modell ist, je nach Quelle, in zwei oder in drei Dimensionen und mit quadratischer oder runder Stabmagnetform dargestellt. Diese Unterschiede sind nicht struktureller Natur, sondern nur verschiedene visuelle Umsetzungen der gleichen Modellidee.

Aber es lässt sich zudem noch ein wirkliches Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Darstellungen des Elementarmagneten-Modells festhalten. Dieses Merkmal bezieht sich auf die Bewegungsfreiheit der Elementarmagnete im Magneten bzw. im ferromagnetischen Stoff.

Nach den Arten der Bewegungsmöglichkeiten werden die zwei verschiedenen Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells im Folgenden „freie Bewegung“ und „drehbare Fixierung“ genannt. Diese beiden Modelltypen I und II werden nun näher charakterisiert.

4.3.1 Modell I (freie Bewegung)

Das Modell I (freie Bewegung) ist überwiegend in den verschiedenen Quellen (Schulbüchern, Zeitschriften, Didaktikbüchern und kompakten Lexiken zur Physik) aufzufinden. Dabei sind die Elementarmagnete im Inneren des Magneten bzw. ferromagnetischen Stoffes frei beweglich und besitzen somit keine fest vorgeschriebene Raumposition. Diese „freie Bewegung“ werden mit verschiedenen Zitaten aus unterschiedlichen Quellen verdeutlichen:

Das Schulbuch „Einführung in die Physik“, Diesterweg, beschreibt, unterstützt durch folgende Abbildung 4.4:

„Die Entstehung von immer kleiner werdenden Teilmagneten führt zu der Vorstellung von nicht mehr teilbaren Elementarmagneten, die in allen ferromagnetischen Körpern enthalten sind. Beim Magnetisieren werden sie durch magnetische Influenz lediglich “ausgerichtet“ (Abb.4.4).“ [IHNE94]

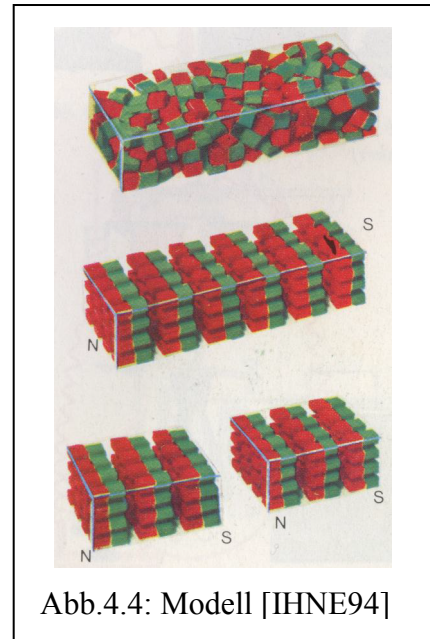


Abb.4.4: Modell [IHNE94]

Das Schulbuch „Natur und Technik“, CVK:

„Du siehst, es ist durchaus möglich, dass auch ein unmagnetisches Stück Eisen aus Elementarmagneten aufgebaut ist; nur müssen diese anders angeordnet sein als in Abb. 4.5. Wie wir uns das vorstellen können, zeigt die Abb. 4.6. Vergleiche sie mit Abb. 4.5: Dort liegen die Elementarmagnete streng geordnet, hier sind sie wirr durcheinander geraten, so dass sich ihre magnetischen Kräfte gegenseitig aufheben.“

„Bringen wir in die Nähe einer unmagnetischen Stricknadel einen starken Magneten oder streichen wir ihn gar über die Nadel hinweg, so ordnen sich die Elementarmagnete der Nadel: Die Stricknadel wird zum Magneten.“. [SCHR97]

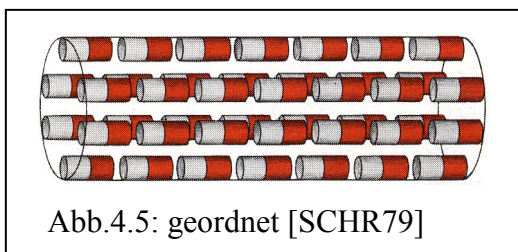


Abb.4.5: geordnet [SCHR79]

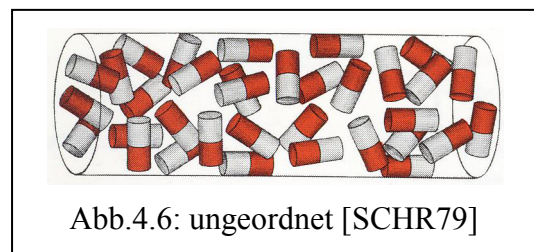


Abb.4.6: ungeordnet [SCHR79]

Aus „Didaktik und Praxis der Schulphysik“ heißt es:

„... Auf diese Weise gelangen wir zu kleinsten Magneten. Diese nennen wir Urmagnete oder Elementarmagnete. (...)

Die Anordnung der Urmagnete

Deutung: Im Inneren eines Magneten sind die Urmagnete einheitlich ausgerichtet (Abb.4.7.a). Entgegengesetzte Pole liegen einander gegenüber. Sie ziehen sich wechselseitig an und lassen keine Wirkung nach außen zurück. Daher sind nur die äußeren Pole an den Stabenden wirksam. Liegen die Urmagnete ungeordnet (Abb.4.7.b), so heben sich ihre Wirkungen nach außen im Ganzen auf. Unter der Einwirkung eines Magneten erfahren die regellos angeordneten Urmagnete eine einheitliche Ausrichtung. Magnetisieren bedeutet Ordnen der Urmagnete.“ [HOUB72]

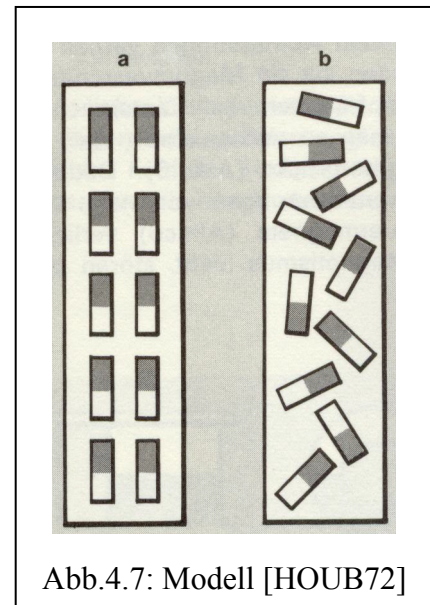


Abb.4.7: Modell [HOUB72]

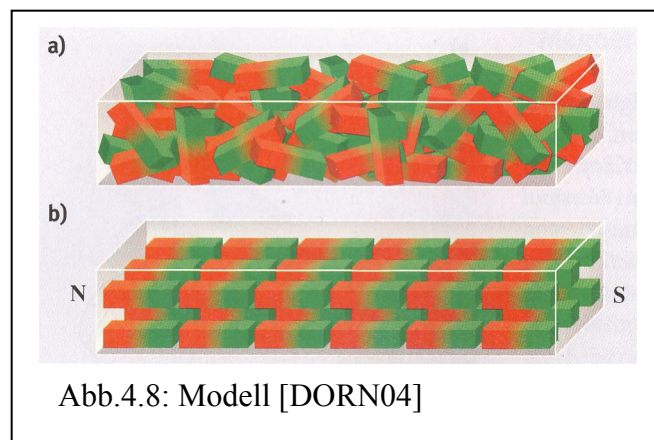
4.3.2 Modell II (drehbare Fixierung)

Neben dem Model I (freie Bewegung) gibt es noch das Modell II (drehbare Fixierung). Bei dieser Variante des klassischen Elementarmagneten-Modells sind die Mittelpunkte der Elementarmagnete in einer Gitter- bzw. Raumgitterstruktur angeordnet. Die Elementarmagnete sind somit fest in der Struktur positioniert und können nur um ihr jeweils eigenes Zentrum kreisen.

Diese Variante „drehbare Fixierung“ ist in wenigen Büchern zu finden, eine explizite Beschreibung dieses Modells II liefert das Schulbuch „Dorn-Bader“ folgendermaßen:

„Nehmen wir einmal an, man könnte die Teilung einer magnetisierten Eisennadel fortsetzen, bis man zu kleinsten, nicht weiter teilbaren Bestandteilen – sozusagen den „Elementen“ des Magneten – käme. Diese Elementarmagnete müssen wiederum Dipole sein. Sie müssen ferner an ihrem Ort drehbar gelagert sein, sodass man sie beim Überstreichen mit einem starken Magneten in einen geordneten Zustand überführen kann.“
[DORN04]

Als Visualisierung zum Elementarmagneten-Modell wird im Dorn Bader die folgende Abbildung gewählt.



Die im Text beschriebene drehbare Lagerung wird aber in der Abbildung 4.8 nicht umgesetzt, was jedoch auch nicht so einfach zu realisieren ist. Diese Diskrepanz kann jedoch Widersprüche bei den Schülern auslösen (siehe Kapitel 6.3).

5. Kapitel

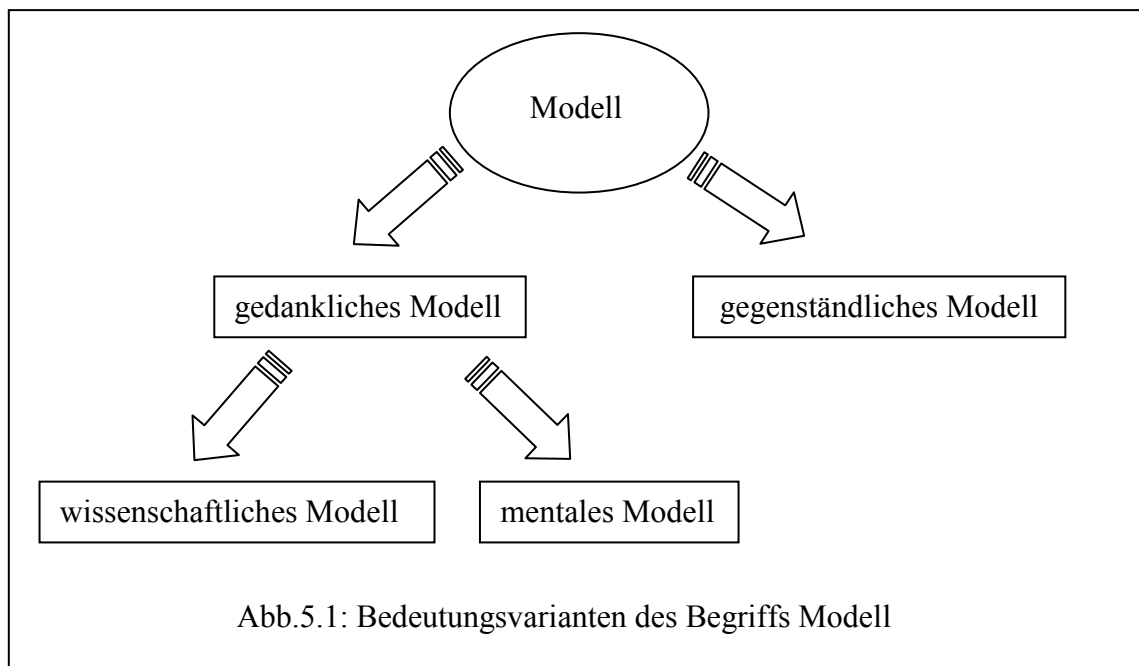
Kriterien zur Analyse der Modelle

Dieses Kapitel beginnt mit einem Überblick über Modelle im Physikunterricht und ihrer Bedeutung aus fachdidaktischer Sicht. Da jedes Modell reduziert, wird anschließend auf die Theorie der Elementarisierung, und insbesondere auf die drei Kriterien der Elementarisierung eingegangen. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der ausführlichen Darstellung und Beleuchtung dieser drei Kriterien, da sie die Grundlage für die Analyse der beiden Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells und des alternativen Elementarmagneten-Modells bilden.

5.1 Modelle im Physikunterricht

Im Physikunterricht werden häufig Modelle verwendet, „um Schülern Erklärungen für beobachtete Phänomene, Ideen beim Aufstellen von Theorien oder ganz einfach Merk- und Verständnishilfen anzubieten“. [BORN83]

Modell – für diesen Begriff gibt es zwei prinzipiell verschiedene Bedeutungen. Analog wie es für den Begriff Farbe im englischen die zwei Übersetzungen „colour“ (Farbe als Sinneswahrnehmung) und „paint“ (Farbe als Mal- und Wandfarbe) gibt, lässt sich auch der Begriff Modell auf zwei Weisen verstehen: Einerseits, Modell als ein gedankliches Konstrukt, und andererseits Modell als ein gegenständliches Sachmodell. Abbildung 5.1 verdeutlicht diese beiden Bedeutungsvarianten.



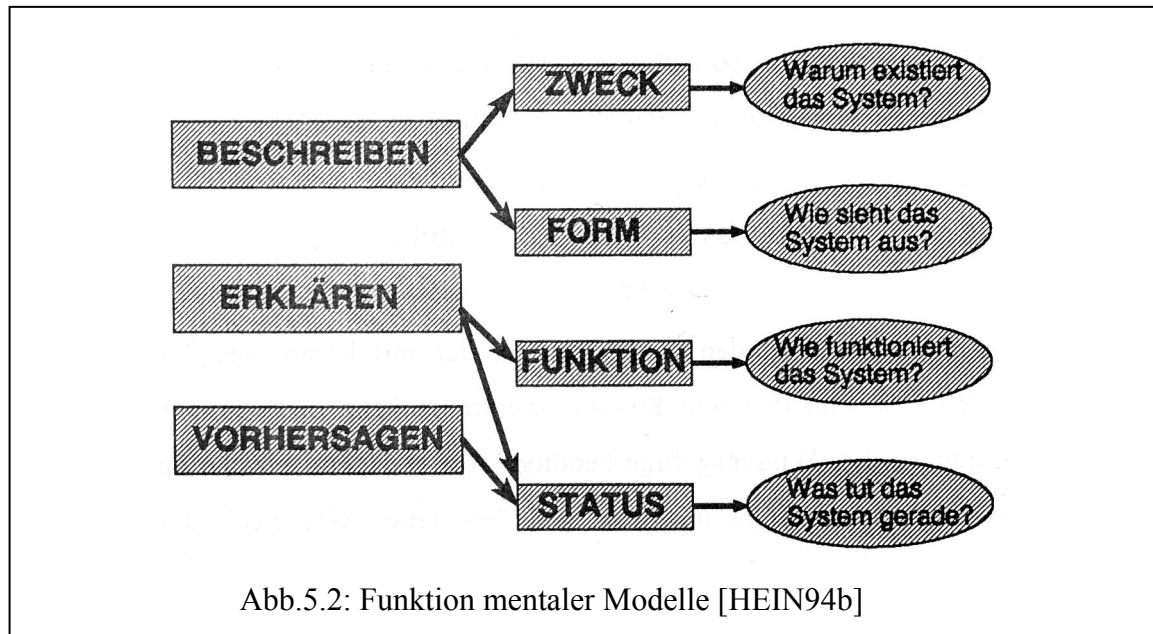
Gegenständliche Modelle (Sachmodelle) existieren auf verschiedenen Ebenen. Zum einen gibt es Nachbauten im Kleinen wie Motormodelle, Schiffsmodelle oder den Globus.

Zum anderen gibt es gegenständliche Modelle von gedanklichen Modellen, beispielsweise den Aufbau des Wasserkreislaufes als Veranschaulichung dessen, dass es Parallelitäten zwischen elektrischen Leitungen und Wasserleitungen gibt. Diese gegenständlichen Realisationen gedanklicher Modelle können gegenständlicher Natur sein, wie gerade beschrieben, oder ikonischer (bildhafter) Natur, beispielsweise ein Bild des Wasserkreislaufes, oder symbolischer Natur mit Hilfe mathematischer Formeln. [REIS03]

Gedankliche Modelle lassen sich in wissenschaftliche Modelle und mentale Modelle unterscheiden.

Wissenschaftliche Modelle sind beispielsweise das Teilchenmodell zum Aufbau der Materie, das Atommodell zum Aufbau des Atoms oder das Strahlen-, Wellen- und Korpuskelmodell zur Natur des Lichtes.

Mentale Modelle hingegen sind naive Wissensgefüge, die konstruiert werden, um sich in einer Welt komplexer Sachverhalte, beispielsweise der Physik, zurechtzufinden. „Augrund mentaler Modelle kann man Erklärungen und Vorhersagen treffen, Gegebenheiten verstehen und entscheiden, welche Handlung erforderlich ist um eine bestimmte Veränderung zu erreichen.“ [HEIN05] (vgl. [HEIN94b])



In der Abbildung 5.2 ist dargestellt, welche Funktionen ein mentales Modell im Umgang mit einem physikalischen System besitzt. Es beschreibt den physikalischen Zweck und den Aufbau, es dient der Erklärung der physikalischen Funktion und des Status und es liefert Vorhersagen über die Zustände, die es annehmen wird.

Schüler besitzen oder entwickeln mentale Modelle beispielsweise zur Erklärung der Naturphänomene, oder darüber, was elektrischer Strom sei, oder wie die Jahreszeiten entstehen. [REIS03] Die mentalen Modelle stimmen jedoch oft nicht mit den wissenschaftlichen Modellen überein. Im Unterricht sollen sich die Schüler ihrer mentalen Modelle bewusst werden (vgl. Kapitel 5.4.1) und wissenschaftliche Modelle erarbeiten. Gegenständliche und ikonische Darstellungen der Modelle sind dabei oft nützlich zum Verständnis, symbolische bereiten den Schülern häufig Schwierigkeiten. [REIS03]

Die betrachteten Elementarmagneten-Modelle sind wissenschaftliche Modelle, sie werden häufig ikonisch dargestellt. Ihre Darstellung erfolgte in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2.

Wissenschaftliche Modelle müssen möglichst einfach sein, ohne die Wirklichkeit allzu sehr zu verkürzen. Somit ist jedes Modell eine Abbildung in einen niederdimensionalen Unterraum, bei der Informationen verloren gehen. Diese Transformation ist notwendig, um Teilaspekte diskutieren zu können. [BORN83]

Welche Informationen verloren gehen dürfen, und welche unabdingbar sind, ist die Frage nach der sinnvollen didaktischen Elementarisierung. [KIRC00]

Eine Schwierigkeit im Umgang mit Modellen besteht für Schüler darin, dass sie dazu neigen, die Wirklichkeit mit ihnen gleichsetzen. Dies liegt daran, dass die Modelle im Gegensatz zu der teils komplexen Wirklichkeit meist sehr konkret, geradezu „handfest“, sind. Die Atommodelle des Chemieunterrichts haben beispielsweise Druckknöpfe, mit denen sie sich verbinden lassen. [BORN83] Daher ist es notwendig, die Grenzen der Modellvorstellung in Unterricht regelmäßig zu thematisieren.

5.2 Elementarisierung und ihre Kriterien

Unter Elementarisierung versteht man nach Schleiermacher den Prozess des *Zerlegens von komplexen Dingen in „elementare Sinneinheiten“* [KIRC00]. Mit diesem Grundprinzip der Elementarisierung setzt er sich gegen Pestalozzi durch, der noch daran glaubte, dass sich der Lehrstoff auf natürlicher Weise in „*Elemente*“ aufteilen lässt, die sich dann wieder in „unveränderlicher, lückenlosen Reihenfolge“ zusammensetzen lassen. Doch solch eine universelle Methode kann es nicht geben. Grund dafür sind zum einen die unterschiedlichen Lernvoraussetzungen, Interessen und Motive der Schüler, und zum anderen die Tatsache, dass sich die Struktur der Physik nicht beliebig zerlegen lässt. Zudem muss man sich laut Schleiermacher bewusst machen, dass das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile. Jedes komplexe physikalische Gerät ist mehr als eine Zerlegung in seine Bestandteile, entscheidend sind die logischen Sinneinheiten.

Deshalb formuliert Schleiermacher: „Das Elementare (in das sich der komplexe Stoff zerlegen lässt) sind Sinneinheiten!“ [KIRC00]. Diesterweg unterstützt seine Auffassung und verfasste es als Aufforderung an die Unterrichtenden: „Gib kleine Ganze!“ [KIRC00]. Weltner versucht diesen Gedanken weiter zu konkretisieren, er definiert das Erklärungsmuster als mathematische Reihe, als Summe aller Erklärungsglieder.

$$\text{Erklärungsmuster} = \sum_i \text{Erklärungsglieder}_i$$

Jedes Erklärungsglied soll dabei in sich schlüssig und abgeschlossen sein, wobei das erste Erklärungsglied einen möglichst großen Erklärungsanteil enthalten soll. [WELT82]

Eine Kunst des Lehrberufs oder der Physikdidaktik beruht darauf, diese elementaren Sinneinheiten ausfindig zu machen, so dass sie wieder sinnvoll für den Lernenden zu einem Ganzen *zusammengebaut* werden können. Um dieses „Wiederaufbauen“ der Sinneinheiten gegenüber der „Zerlegung in Sinneinheiten“ zu akzentuieren, prägt Kattmann den Begriff *didaktische Rekonstruktion* im Gegensatz zum Elementarisierungsbegriff. [KATT97]

Doch welche Kriterien bestimmen die Qualität einer Elementarisierung, einer didaktischen Rekonstruktion? Dabei müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, die sich nach physikdidaktischen Diskussionen (vgl. [BLEI91], [JUNG73], [KIRC85], [KIRC95], [WELT82]) der letzten Jahrzehnte unter folgenden drei Kriterien zusammenfassen lassen:

Die Elementarisierung muss
fachgerecht, schülergerecht und zielgerecht sein. [KIRC00]

Das Elementarmagneten-Modell muss sich somit als Elementarisierung genau mittels dieser drei Kriterien analysieren lassen. Doch wann ist ein Modell fach-, schüler- und zielgerecht? Bei offensichtlichen Beispielen lassen sich diese drei Kriterien der Elementarisierung sehr leicht erklären und voneinander abgrenzen. Beispielsweise, dass „Ladungsmännchen“ nicht fachgerecht sind, oder dass das quantenmechanische Atommodell für die Sekundarstufe I zu abstrakt ist, und somit nicht schülergerecht.

Eine konkrete Definition dieser drei Kriterien wird in den nun folgenden drei Kapiteln gegeben. Das Kriterium **fachgerecht** wird im Kapitel 5.3, das Kriterium **schülergerecht** im Kapitel 5.4 und das Kriterium **zielgerecht** im Kapitel 5.5 dargestellt.

Abschließend wird im Kapitel 5.6 eine Zusammenfassung über die Definition und Abgrenzung dieser drei Kriterien gegeben. Sie sind wichtig, da sie die Analyse Kriterien für die beiden Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells sowie des alternativen Elementarmagneten-Modells bilden.

5.3 Fachgerechte Elementarisierung

Der Begriff *fachgerecht* (= fachlich relevant) lässt sich relativieren über das Begriffspaar „fachlich richtig — fachlich falsch“. [KIRC00] Mit dem Erklärungsmuster muss man der Sache, dem Gegenstand gerecht werden, ihn also auf seine wichtigen, ihn gegenüber anderen Gegenständen auszeichnenden, Eigenschaften hin darstellen und diese hervorheben. Dabei dürfen und ggf. müssen im Sinne der Elementarisierung Nebenaspekte vernachlässigt werden. Auch der Hauptaspekt darf zum besseren Verständnis vereinfacht werden, aber nur so weit, wie der physikalische Sinn nicht verfälscht und die Funktionsweise nicht auf falsche physikalische Grundlagen bezogen wird.

Zudem muss das Erklärungsmuster so gewählt werden, dass die Lernenden, an dieses „Teilwissen“ anknüpfend, sinnvoll die nächsten physikalischen Inhalte anschließen können, so dass sich bei ihnen ein semantisches Netzwerk kognitiver Strukturen ausbauen kann. Jung (1973) bezeichnet diese notwendige Eigenschaft des Erklärungsmusters als „erweiterbar“. „Erweiterbar bedeutet dabei, dass grundlegende Bedeutungen eines Begriffes oder Modells erhalten bleiben und neue Eigenschaften, neue Begriffe und Gesetze hinzugefügt werden“ können [KIRC00]. Insbesondere kann es aber auch bedeuten, dass sich im Sinne des Aufbaus eines physikalischen Weltbildes *neue* Interpretationen der Begriffe anschließen, von der phänomenologischen Sicht auf die Welt hin zur physikalischen Wahrnehmung der Welt.

Da die Physik als Wissenschaft sich mit der Lösung physikalischer Probleme beschäftigt, und das Fach Physik diese Lösungsansätze vermitteln möchte, benötigt man letztlich zur Überprüfung der Fachgerechtigkeit auch einen tiefen Einblick in die Theorie des Problemlösens. Kognitionswissenschaftler haben dazu ein allgemeines theoretisches Konstrukt entwickelt, welches im folgenden Unterkapitel dargestellt wird.

5.3.1 Theorie des Problemlösens

Unter „Problemlösen“ versteht man Verhaltensweisen, die drei wesentliche Merkmale aufweisen:

1. Zielgerichtetheit
2. Zerlegung in Teilziele
3. Anwendung von Operatoren¹²

Der deutsche Gestaltpsychologe Köhler hat dies 1917 herausgefunden, in dem er das Problemlöse-Verhalten von Schimpansen auf der kanarischen Insel Teneriffa untersuchte. Die Aufgabe, die ein Schimpanse zu lösen hatte, bestand darin, mittels zweier kurzer Stangen an eine Banane zu gelangen, die außerhalb seines Käfigs weiter entfernt als eine Stablänge lag. Nachdem der Schimpanse sich erfolglos mit einer Stange bemüht hatte, die Banane zu erreichen, und sich frustriert weggesetzt hatte, hatte er plötzlich eine Idee, die man als kreatives Problemlösen bezeichnen kann. Er steckte die beiden Stangen ineinander und konnte mit der nun verlängerten Stange das Futter erreichen.

Die drei charakterisierenden Merkmale des Problemlöseprozesses werden an diesem Beispiel verdeutlichen: Das Verhalten des Schimpansen ist eindeutig auf ein Ziel hin gerichtet, die Banane. Dieses Ziel hat er in Teilziele unterlegt, zuerst musste er sich (durch Aufnehmen und Zusammenstecken beider Stangen) ein entsprechend langes Hilfsmittel bauen, und dann damit die Banane „angeln“. Dieses Zerlegen in Teilziele ist nur deshalb sinnvoll, weil der Schimpanse die einzelnen Operatoren, Handlungen, kennt, die in einer Sequenz ausgeführt, den vorhandenen Problemzustand in den Lösungszustand überführen, nämlich das „Stab bauen“ und das „Angeln“. [KÖHL17]

Doch wie hat der Schimpanse diese Operatoren erworben? Welche Möglichkeiten gibt es insgesamt, Operatoren zu erwerben? Laut Anderson [ANDE96] gibt es mindestens drei Arten des Problemlöseoperatoren-Erwerbs: durch *Entdecken*, durch *Nachahmung* / *Analogiebildung* und durch *Instruktion*.

¹² Handlungen, die den Problemzustand in einen anderen überführt.

Beim *Entdecken* ist man ganz auf sich, seine Ideen und den Zufall angewiesen. Man versucht ohne Fremdhilfe das Problem zu lösen.

Die *Nachahmung* ist besonders in der Tierwelt sehr ausgeprägt, daher stammt auch der Ausdruck „nachäffen“. *Analogiebetrachtungen* werden meist von Menschen vollzogen. (Beispielsweise benutzte Rutherford das Sonnensystem als Modell für die Atomstruktur. Dabei setzte er die Sonne mit dem Atomkern gleich und die kleineren Planeten, die um die Sonne kreisen, entsprechen den Elektronen, die um den Kern kreisen. [GENT83])

Das Erlangen der Operationen durch *Instruktion* beruht hingegen auf der Kommunikation und ist somit eine rein menschliche Möglichkeit.

Verschiedene Arbeiten von Reed und Bolstad [REED91] im Bereich der Mathematik, von Cheng und Holyoak [CHEN86] im Bereich der Logik und von Fong, Krants und Nisbett [FONG86] im Bereich der Statistik weisen darauf hin, dass das beste Lernen von Operatoren erzielt wird, wenn die Probanden sowohl mittels Nachahmung als auch mittels Instruktion geschult werden. Komplexe Instruktionen allein können häufig schwierig zu verstehen sein, während im Gegensatz bei der Nachahmung einer Beispielaufgabe die Schwierigkeit in der Übertragung auf ein anderes Problem bestehen kann.

Die Problemlöseoperatoren lassen sich formal mittels eines allgemeinen theoretischen Konstruktes, den Produktionensystemen, darstellen. „Produktionensysteme bestehen aus einer Menge von Produktionen, die Regeln zur Lösung eines Problems sind.“ [ANDR96]

Jede einzelne Regel, jede Produktion, besteht aus einer Bedingung, dem *Wenn-Teil*, und aus einer Aktion, dem *Dann-Teil*. Jeder Operation ist eine Produktion zugeordnet. Die Produktionenregel wird an der ersten Operation des Schimpansen verdeutlicht:

Operation: langen Stab bauen

Wenn das Ziel darin besteht, einen langen Stab zu bauen,

und man zwei hohle Stäbe hat,

und diese geeignete Durchmesser aufweisen,

Dann schiebe die beiden Stäbe ein Stück ineinander.

Die Produktion ist in eine Bedingung (Wenn-Teil) und eine Handlung (Dann-Teil) geteilt. Die Bedingung enthält eine Zielaussage (langen Stab bauen) und zudem noch die Voraussetzung (hohle Stäbe, geeignete Durchmesser), die erfüllt sein muss, um die Handlung (Stäbe ineinander schieben) auszuführen.

Die Produktionsregeln entwirren kompakte Problemlöseoperationen, indem sie diese in Wenn-Dann-Regeln packen.

Für den Physikunterricht lässt sich aus diesem gestaltpsychologischen Ansatz eine exakte Darstellungs- und Vorgehensweise des Problemlösens gewinnen:

- „Zielgerichtetheit“ bedeutet, dass der Schüler ein klares Ziel, eine klare Aufgabe hat, beispielsweise das Auffinden der Erklärung eines physikalischen Phänomens.
- „Zerlegung in Teilziele“ meint dann, dass sich die Erklärung des Problems in Teilerklärungen zerlegen lässt. Diese Zerlegung ähnelt einer Elementarisierung.
- „Anwendung von Operatoren“ sagt schließlich aus, dass der Schüler die einzelnen Teilerklärungen, die entsprechend zusammengesetzt die Enderklärung ergeben, eigenständig im Vorhinein beherrschen muss.

Zum Erlangen der Enderklärung des Phänomens muss der Schüler nun die einzelnen Erklärungen entsprechend zusammensetzen und insgesamt nachvollziehen.

Um somit eine Rekonstruktion „fachgerecht“ zu nennen, muss sie für den Schüler durch Anwenden von Problemlöseoperatoren erschließbar werden. Letztlich sollte sich somit das Phänomen mittels Produktionsregeln erklären lassen.

5.4 Schülergerechte Elementarisierung

Die beste fachgerechte Elementarisierung allein hilft keinem Lernenden, wenn sie nicht zugleich auch auf seine individuellen Bedürfnisse, auf seine Vorkenntnisse eingeht, und ihn bei seinem möglicherweise falschen Vorwissen, bei seinen mentalen Modellen (vgl. Kapitel 5.1), abholt. [KIRC00]

Diese Angemessenheit der Elementarisierung an die kognitive Struktur der Schüler ist laut Bleichroth das wichtigste Kriterium, welches aber zugleich auch am schwierigsten in der Umsetzung ist. [BLEI99]

Seine Handhabung erfordert einen tiefen Einblick in die verschiedensten Bereiche. Zum einen benötigt man einen breiten Erfahrungs- und Erkenntnisschatz über die möglichen Vorkenntnisse und mentalen Modelle der Schüler, zum anderen einen tiefen Einblick in die Entwicklungspsychologie der Schüler verschiedenen Alters. Zudem sind Wissen über kognitive Vernetzungen, Wissensrepräsentationen, lernpsychologische Ursachen tragen Wissens sehr hilfreich. Diese verschiedenen Bereiche werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt und ihre Bedeutsamkeit geklärt.

5.4.1 Mentale Modelle des Magnetismus – ein Forschungsüberblick

Erickson [ERIC94] untersuchte die Magnetvorstellungen von Kindern im Alter von 9 bis 14 Jahren in Kanada. Dazu gab er jedem Schülerpaar mehrere Magnete, die in ihrer Größe, Masse und Aussehen einander ähnelten, mit der Aufgabe, Experimente zu planen und durchzuführen, um den stärksten Magneten ausfindig zu machen. Anhand der Strategien, Überlegungen und Versuche, die die Kinder ausführten, war es ihm möglich, Hinweise auf ihre mentalen Modelle zu erhalten. 1994 beschreibt Erickson drei mentale Modelle des Magneten. (vgl. Funktionen der mentalen Modelle [HEIN05])

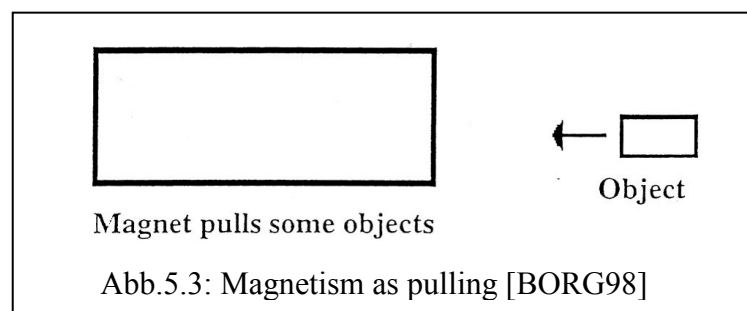
- „*pulling magnet*“ *model* (anziehender Magnet)
Das „pulling magnet“ - Modell stellt letztlich nur eine Beschreibung der Beobachtung dar. Die Schüler assoziieren mit dem Magneten den anziehenden Effekt, eine weitere Kausalität benötigen sie nicht. Diese Magnet - Vorstellung war überwiegend bei den jüngeren Schülern aufzuspüren.
- „*emanating magnet*“ *model* (ausstrahlender Magnet)
Das „emanating magnet“ - Modell erklärt die Wirkung des Magneten mittels Strahlen oder hervortretender Energie, die vom Magneten ausgeht und auf das betrachtete Objekt zielt. Schüler denken dabei oft, dass eine dicke Barriere zwischen Magnet und Objekt diese hervortretenden Strahlen blockieren kann. Bei dieser Modellvorstellung liegt im Vergleich zum „pulling magnet“ - Modell ein einfacher Mechanismus zur Einwirkung der Distanz zugrunde.
- „*enclosing magnet*“ *model* (umschließender Magnet)
Dem „enclosing magnet“ – Modell schließlich liegt die Vorstellung zu Grunde, dass die Strahlen, die aus dem Magneten austreten, danach auseinander gehen und so ein Gebiet der Influenz erschaffen. Dieses wurde manchmal als magnetisches Feld bezeichnet. [ERIC94]

Neben Erickson erforschten Borges und Gilbert [BORG98] ebenfalls die mentalen Modelle zum Magnetismus, aber in einer anderen Altersspanne. Zur Datenerfassung wurden 56 Personen Brasiliens befragt, darunter Schüler im Alter von 15 und von 18 Jahren (ohne und mit Unterricht zum Magnetismus), Physik-Lehrer, Techniker und Ingenieure. Das Interview basierte jeweils auf Fragensequenzen nach Vorhersagen – Beobachtungen – Erklärungen zu einem gegebenen magnetischen Aufbau. Der Fragebogen ist im Anhang abgedruckt.

Borges und Gilbert schlugen 1998 eine Klassifizierung in fünf Modelltypen vor, die von einer einfachen Beschreibung des magnetischen Effekts bis hin zum Feldmodell führt. Diese fünf mentalen Modelle werden im Folgenden vorgestellt:

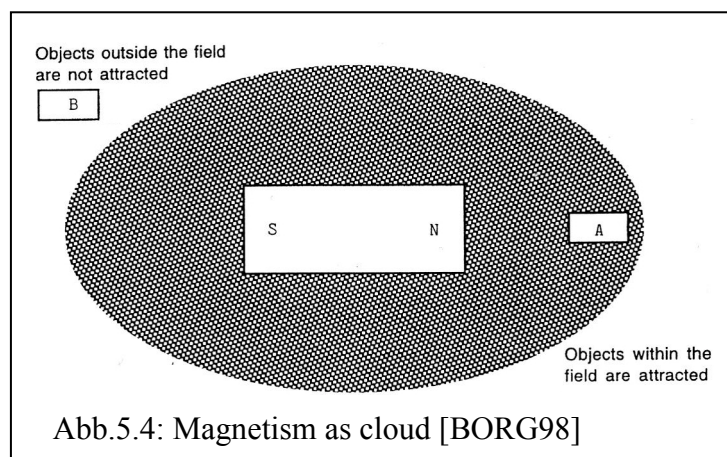
- A: „*magnetism as pulling*“ (Magnetismus als Anziehendes)

Für Personen, die diese mentale Vorstellung besitzen, verhält sich der Magnet deshalb so, wie er sich verhält, weil es zu seinen Eigenschaften zählt. Eine weitere Erklärung ist für Besitzer dieses mentalen Modells nicht von Nöten. Dieses Modell stimmt mit dem „pulling magnet“- Modell von Erickson überein. Menschen mit dieser Vorstellung hatten bisher einen sehr kleinen Einblick in die Wissenschaft, so dass sie keine Idee zu den einzelnen Verhaltensweisen des Magnetismus in verschiedenen Situationen haben oder sie verfügen nicht über eine interne Wissensstruktur, die weitere Erklärungen ermöglicht.



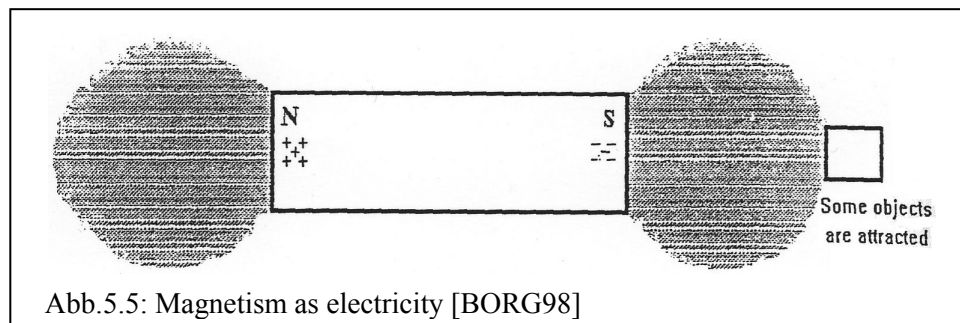
- B: „*magnetism as a cloud*“ (Magnetismus als eine Wolke)

Dieses Modell stellt einen ersten Erklärungsversuch der beobachteten magnetischen Phänomene dar. Der Magnetismus wird sich ähnlich einer Wolke, als einen „Bereich der Influenz“, als eine Umgebung des Magneten, vorgestellt. Diese Umgebung ist der Vorstellung nach begrenzt, d.h. liegt ein Objekt im Wirkungsbereich, so wird es angezogen, außerhalb nicht. Personen, die dieses mentale Modell besitzen, beschreiben magnetische Phänomene mit Begriffen „the action on this region“, und benutzen nicht solche Formulierungen „magnet’s action on the objects in it“. Dieses mentale Modell umfasst das „enclosing magnet“ – Modell von Erickson.



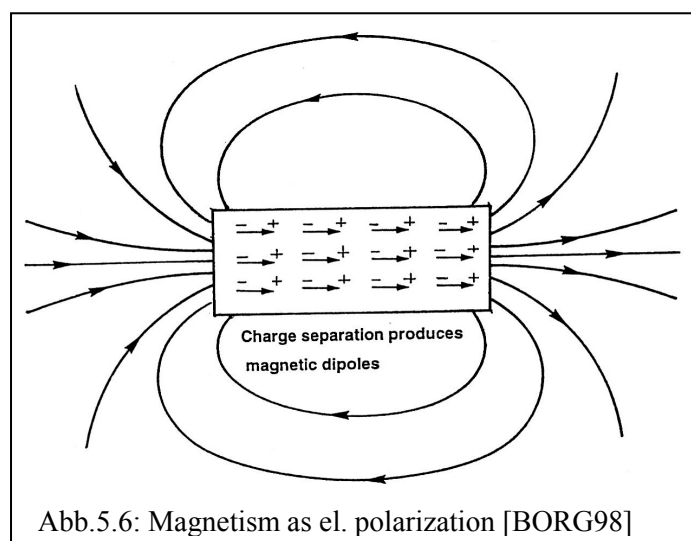
- C: „magnetism as electricity“ (Magnetismus als Elektrizität)

Diese nächste Vorstellung vom Magnetismus beruht auf der grundlegenden Idee zur Erklärung der Elektrizität. Magnetismus wird als Anziehung zwischen positiven und negativen elektrischen Ladungen wahrgenommen, aber es gibt in ihrer Vorstellung keine explizite Erklärung zwischen der Anziehungskraft und dem magnetischen Feld. Magnetische Pole sind für Personen mit diesem mentalen Modell einfach Gebiete, üblicherweise an den Enden des Magneten, die einen Überschuss und einen Mangel an Elektrizität haben. Dieses mentale Modell scheint mit dem „emanating magnet“ – Modell von Erickson überein zustimmen.



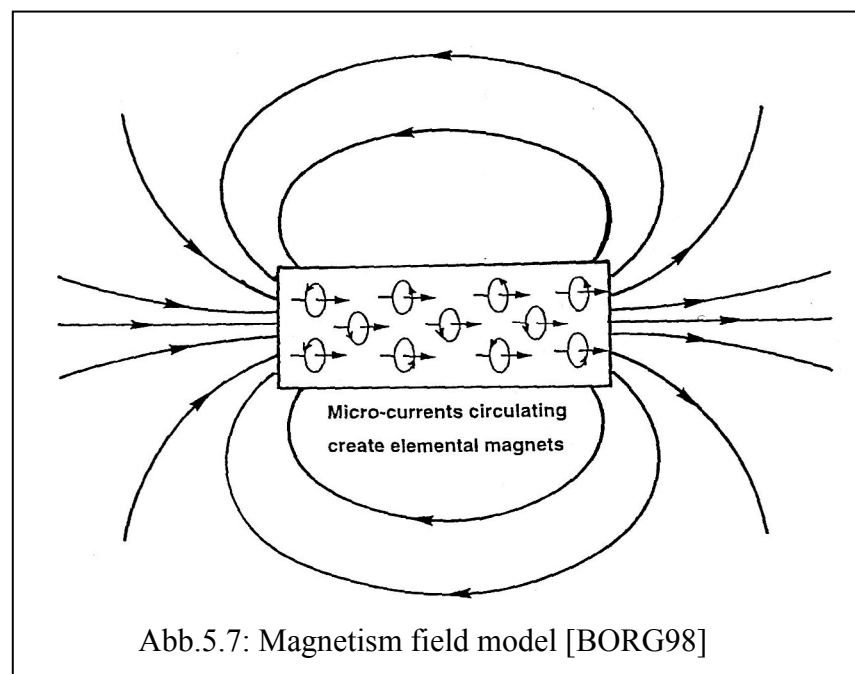
- D: „magnetism as electric polarization“ (Mag. als elektrische Polarisierung)

Dieses mentale Modell lässt sich dadurch charakterisieren, dass es zur Erklärung der beobachteten Phänomene Ideen aus dem Bereich der Elektrostatik importiert. Vom zuvor beschriebenen Modell „magnetism as electricity“ unterscheidet es sich dadurch, dass sich hier die positiven und negativen Ladungen ausrichten. Dieses Modell kann somit auch den Effekt erklären, dass ein Stück des Magneten selbst wieder ein Magnet ist. Es zeigt deutlich, dass es in der Vorstellung wohl häufig nur einen geringen Unterschied zwischen magnetischen und elektrischen Dipolen gibt.



- E: „*magnetism field model*“ (Magnetismus Feldmodell)

Das Feldmodell lässt sich als eine Zusammensetzung der Modelle B, C und D charakterisieren. Der Magnetismus existiert in der Vorstellung auf einer mikroskopischen Ebene, entweder als eine Menge magnetischer Dipole in Folge der kreisförmigen Bewegung elektrisch geladener Teilchen im Atom oder auf der Basis vieler Elementarmagnete. Das Phänomen des Anziehens und Abstoßens wird mit der Dipolgestalt des Magneten erklärt. Personen, die diese mentale Vorstellung zeigten, konnten exakte Erklärungen geben und benutzten physikalisches Fachvokabular wie „elemental magnets“ und „micro-current circulating in closed loops within materials“. Der Großteil der Lehrer und viele Ingenieure besaßen dieses mentale Modell. [BORG98]



Dieser Überblick über die mentalen Modelle ist sehr nützlich und hilfreich, um die verschiedenen Verstehensstadien und die möglichen Schwierigkeiten bei den Schülern nachvollziehen zu können.

5.4.2 Entwicklungspsychologie und ihre physikdidaktischen Folgerungen

Neben dem Forschungsüberblick über die mentalen Modelle ist zur Beleuchtung des Kriteriums „schülergerecht“ auch die Entwicklungspsychologie zu Rate zu ziehen. Aus der sehr umfangreichen Lehre dazu von Piaget sind für den Physikunterricht besonders folgende drei Forschungsergebnisse von großer Bedeutung:

1. „Die individuellen physikalischen Begriffe entwickeln sich bis etwa zum 16. Lebensjahr.
2. Die Begriffe werden weiterentwickelt, wenn der Mensch mit den ihm verfügbaren Begriffssystemen neue Phänomene, die ihn bewegen, nicht verstehen kann.
3. Die Entfaltung des physikalischen Denkens kann und soll nicht wesentlich beschleunigt werden. Die Entwicklung ist – trotz gesellschaftlicher, sprachlicher und anderer Einflüsse – vorwiegend biologisch bedingt. Die gilt insbesondere für die (...) Entwicklungsstufen (...).“ [BORN83]

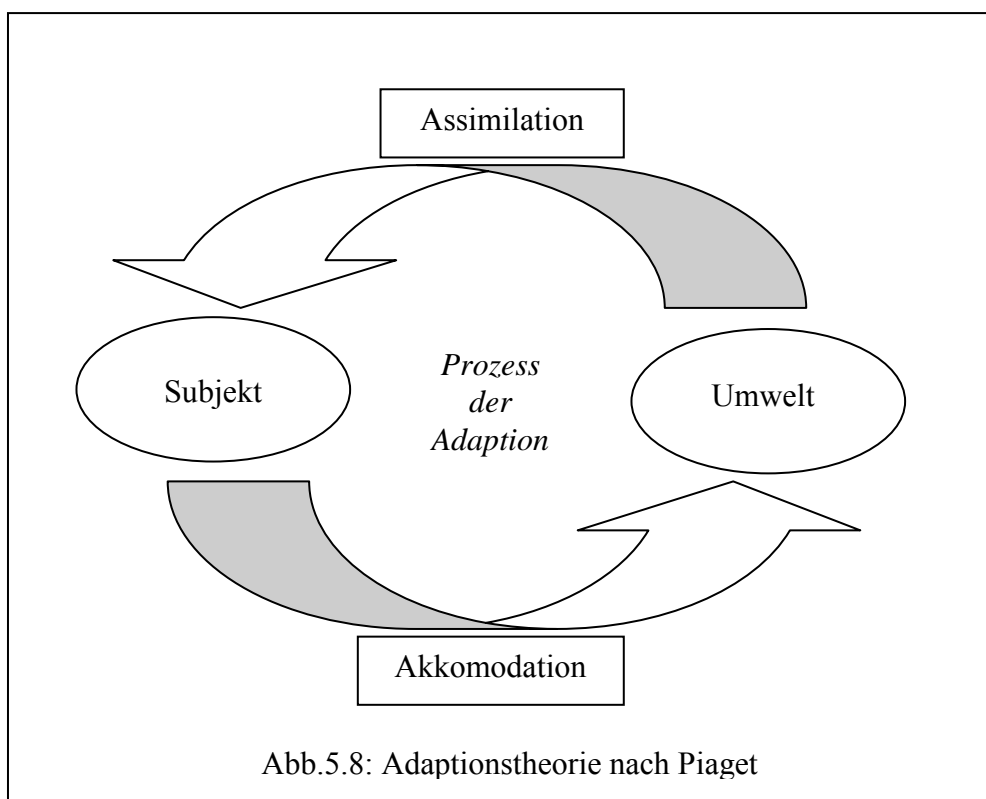
Diese werden nun im Einzelnen ausführlich erläutert.

Zu 1.: Piaget erforschte die Begriffsentwicklung bei Kindern, indem er ihnen Fragen zu Experimenten stellte. Um Vorstellungen zum Geschwindigkeitsbegriff zu erhalten, fragte er beispielsweise, welches von zwei Spielzeugautos schneller sei. Für Kinder ist das Auto schneller, das das andere überholt. Sehen sie den Überholvorgang nicht, so können sie anhand des Autostandes vor und nach dem Überholvorgang nicht die Frage beantworten. Die Kinder bringen die Geschwindigkeit noch nicht mit dem zurückgelegten Weg und der dabei benötigten Zeit in Verbindung.

Und wenn sie dann später in der Lage sind, diese Größen dazu in Verbindung zu setzen, kann es dabei zu sonderbaren Relationen kommen. Dazu werden zwei Autos betrachtet, die gleichzeitig starten und auch gleichzeitig ihr Ziel erreichen, wobei das eine Auto den geradlinig Weg und das andere Auto einen Weg in Form eines Halbkreises genommen hat. Auf die Frage von Piaget, welches Auto schneller sei, antworten 5-jährige, dass die Geschwindigkeit des geradlinig fahrenden Autos größer sei, da sein Weg kürzer ist. Frühestens ab 12 Jahren ist man nach Piaget in der Lage, die physikalische Gleichung (Geschwindigkeit = Weg durch Zeit) sinnvoll zu verstehen.

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass eine bloße Definition von Begrifflichkeiten bei weitem nicht ausreicht, um eine Verankerung der physikalischen Begriffe im Denken des Schülers zu erlangen.

Zu 2.: Im Zentrum von Piagets Theorie steht die Adaption (lateinisch *adaptare*: anpassen), die Anpassung zwischen Organismus und Welt. Die Adaption besteht aus zwei komplementären funktionalen Prozessen, der Assimilation und der Akkomodation. [PIAG00]



Unter Assimilation versteht man den kognitiven Prozess, die Umwelt, neue Sachverhalte und Gegebenheiten in bereits vorhandene kognitive Strukturen einzupassen.

Akkomodation hingegen bezeichnet den Prozess, der stattfindet, wenn sich zur Umwelt, zu einem neuen Sachverhalt, keine Anknüpfungspunkte in der kognitiven Struktur finden lassen, und in Folge dessen weitgehend neue Vorstellungen und Schemata aufgebaut werden müssen.

Der Prozess der Assimilation ist sehr viel leichter für den Lehrer zu aktivieren als den der Akkomodation. Zur Assimilation hilft dem Schüler eine *Elementarisierung* des Neuen, die in ihrer Struktur seiner vorhandenen kognitiven Struktur entspricht. Je besser diese Abstimmung erfolgt, desto leichter fällt dem Schüler die Assimilation. Die Akkomodation ist wesentlich schwieriger, da sie trotz Elementarisierung per Definitionem keine Anknüpfung in der kognitiven Struktur finden lässt. Der Schüler muss sich neue kognitive Strukturen in diesem Bereich aufbauen. [BLEI99]

Zu 3.: Zudem müssen entwicklungspsychologische Aspekte berücksichtigt werden. Welcher Erkenntnisstand ist auf dieser Entwicklungsstufe überhaupt maximal möglich? Natürlicherweise sollte man den gleichen physikalischen Sachverhalt einem Erwachsenen anders näher bringen als beispielsweise einem Kind in der konkretoperativen Stufe. Piaget hat den Prozess von der Geburt eines Kindes bis hin zum Erwachsensein beobachtet und analysiert, und die kognitive Entwicklung in vier Entwicklungsstufen eingeteilt, die sich ihrerseits jeweils weiter unterteilen lassen.

1. Stufe	Sensumotorische Stufe Alter von 0–2 Jahren	Basis für künftige Denkprozesse, Koordinierung von Wahrnehmung und Bewegung
2. Stufe	Präoperative Stufe Alter von 2-7 Jahren	Denken wird von eigener Wahrnehmung und äußeren Reizen geleitet
3. Stufe	Konkretoperative Stufe Alter von 7-12 Jahren	Noch kein abstraktes Denken, Denken nicht mehr durch Egozentrismus geleitet
4. Stufe	Formaloperative Stufe Alter ab 12 Jahren	Abstraktes Denken möglich

Die Altersangaben sind hierbei nicht als Dogmen zu interpretieren, sondern als grobe Anhaltspunkte, die von vielen Einflüssen abhängen. Die Übergänge zwischen diesen Entwicklungsstufen verlaufen kontinuierlich und setzen nicht bei allen Säuglingen und Kleinkindern zur gleichen Zeit ein. Hierbei spricht man von der „horizontalen Verschiebung“. Die Abfolge der einzelnen Entwicklungsstufen ist nicht variabel, d.h. eine höhere Entwicklungsstufe kann nicht vor einer niedrigeren erreicht werden. Zudem geht unter normalen Bedingungen eine einmal erfahrene oder gelernte Erkenntnis nicht mehr verloren.

In der sensumotorischen Stufe entwickeln Kinder Schemata über die physikalische Welt, beispielsweise entwickeln sie ein Konzept zur Objektpermanenz. (Sie realisieren, dass ein zugedecktes Objekt immer noch existiert.)

Die präoperative Stufe ist von Egozentrismus¹³ und animistischem Denken¹⁴ geprägt. Beispielsweise versteckt sich ein Kind, in dem es sich selber die Augen zuhält. Oder es erklärt, dass „die Wolken sehr langsam gehen, weil sie keine Füße haben.“ Die Analysen von Kindern dieser Stufe sind häufig auf ein Merkmal zentriert. Bekannt sind Piagets Umschüttaufgaben, bei denen Kindern zur Ermittlung des größeren Wasservolumens nur auf die Höhe des Wasserstandes in dem Gefäß achten, nicht aber auch auf die Grundfläche. Insgesamt sind die mentalen Prozesse noch sehr intuitiv, es fehlt ihnen an Systematik.

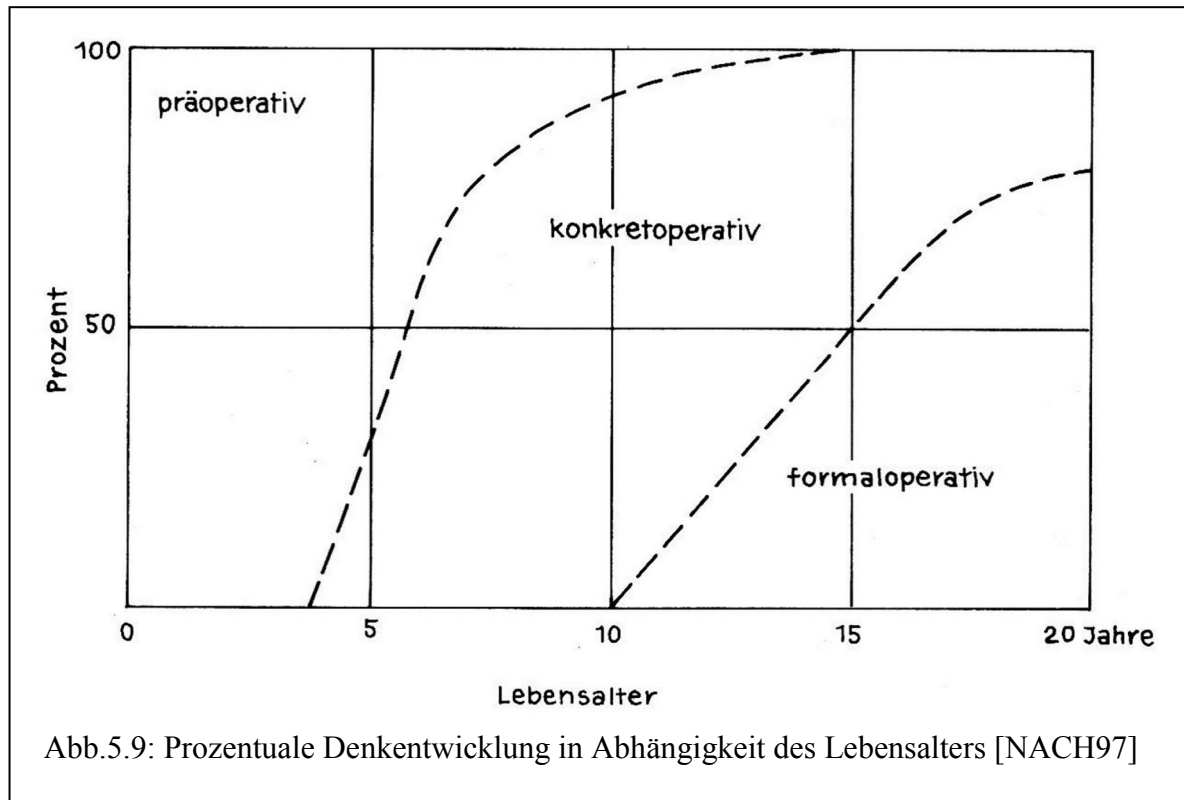
In der konkretoperativen Stufe ist das Kind in der Lage, mehrere Aspekte gleichzeitig zu beachten und seine Aufmerksamkeit zu zentrieren, zudem kann es Abläufe gedanklich umkehren, das bedeutet, dass es sich von konkreten Abläufen eines Geschehens lösen kann. Außerdem hat das Kind eine Reihe mentaler Operatoren (siehe Kapitel 5.3.1) entwickelt, so dass es sich in einer systematischen Art und Weise mit der physikalischen Welt auseinander setzen kann. Es kann zu einem tatsächlichen Phänomen eine Hypothese formulieren und diese in der Wirklichkeit überprüfen. Im Hinblick auf die Fähigkeit des abstrakten Denkens bestehen jedoch noch wesentliche Mängel.

In der formaloperativen Stufe verfügen die Heranwachsenden sowohl über einen Plan, als auch über die Operatoren, die zur Problemlösung erforderlichen sind. Sie können systematisch die verschiedenen Größen variieren, um ihren Einfluss zu analysieren und sind so in der Lage, ihre Hypothese zu überprüfen. Sie können aus beliebigen Axiomen konsequent Schlüsse ziehen, ohne sie durch eigene Erfahrung abzuwandeln. Sie denken kombinatorisch und in Proportionen.

Sogar Erwachsene kehren auf die konkretoperative Stufe zurück, wenn sie mit neuen Sachverhalten konfrontiert werden. [BORN83] Untersuchungen von Nachtigall [NACH79] weisen darauf hin, dass nicht alle Menschen die formaloperative Stufe erlangen.

¹³ Zentrierung des Denkens auf die eigene Sichtweise

¹⁴ Kinder sehen die Welt mit Seele, Intentionen und Bewusstsein ausgestattet.



Hieraus ergibt sich direkt eine Schlussfolgerung für den Physikunterricht. Die Physik ist formaloperativ aufgebaut, aber die meisten Schüler der Sekundarstufe I und einige der Sekundarstufe II können (noch) nicht formaloperativ denken, so hat der Lehrer die Aufgabe, die Physik zu „übersetzen bzw. Probleme auszuwählen, die mit den konkretoperativen Denkmustern erfolgreich zu bewältigen sind.“ [BORN83]

Anderenfalls könnte es beim Schüler zum Beispiel zu Unverständnis oder Trägem Wissen kommen. Auf verschiedene lernpsychologischen Erklärungen zum Trägen Wissen, wird nun eingegangen.

5.4.3 Träges Wissen und seine lernpsychologischen Erklärung

Eine weitere lernpsychologische Grundlage, die hilfreich ist, um über das Kriterium „schülergerecht“ urteilen zu können, ist die Theorie des Trägen Wissens.

„Oftmals wird Wissen, obwohl scheinbar vorhanden, nicht eingesetzt, wenn es gilt, anstehende Probleme zu lösen. Man spricht in diesem Zusammenhang von Trägem Wissen.“ [RENK96]

Träges Wissen ist Wissen, dass der Schüler zwar abstrakt verstanden hat, jedoch nicht konstruktiv beim Problemlösen (vgl. Kapitel 5.3.1) einsetzen kann oder auf neue Probleme übertragen kann. Es existiert für ihn eine Kluft zwischen Wissen und Handeln. [BRAN97]

Die Literatur gibt für dieses Phänomen des Trägen Wissens drei Erklärungsmöglichkeiten: Metaprozesserklärung, Strukturdefiziterklärung und Situiertheitserklärung. [RENK96]

Man spricht von einer **Metaprozesserklärung**, wenn das notwendige Wissen vorhanden ist, aber nicht angewendet werden kann, da Metaprozesse es behindern. Es gibt eine Reihe von Metaprozessen, die ursächlich sein können. Motivationale oder volitionale Erklärungen, beispielsweise kein Interesse, keine intrinsische Motivation oder schlichtweg, dass einfach der Wille zu einem anderem Handeln überwiegt.

Es ist aber auch möglich, dass wider besseren Wissens bewusst abgewogen und letztlich anders gehandelt wird (die so genannte Kosten-Nutzen-Erklärung) oder, dass man innerlich der Annahme ist, dieses Gebiet sowieso nicht zu beherrschen, und daher erst gar nicht mit dem Handeln startet (dysfunktionale epistemologische Überzeugungen).

Die **Strukturdefiziterklärung** ist eine weitere Erklärungsvariante für Träges Wissen. Dabei geht man davon aus, dass die Struktur des Wissens nicht ausreichend ausgebaut ist, um es anzuwenden. Auch hierbei gibt es verschiedene Varianten. Es können Defizite im konzeptuellen Wissen vorliegen, deren Repräsentanten in Kapitel 5.4.4 dargestellt werden. Oder es liegt an einer mangelnden Wissenskompilierung, das bedeutet, dass es Schwierigkeiten beim Umwandeln deklarativen Wissens (Faktenwissen) in prozedurales Wissen (Handlungswissen) gibt. Nach der ACT – Theorie (Adaptive Control of Thought) von Anderson erfolgt dieser Prozess in drei Stufen, der deklarativen Stufe, der Kompilation und dem Tuning. [ANDE96]

Eine andere Variante fußt auf der Annahme, dass das explizite Wissen, Wissen, das beispielsweise in Tests bewusst wieder gegeben werden kann, und das implizite Wissen, das nur bei der Ausführung verschiedener Aufgaben zum Vorschein kommt, zwei getrennte Systeme sind, die nicht zwangsläufig miteinander wechselwirken.

Eine weitere Variante der Strukturdefiziterklärung wird Wissenskompartimentalisierung genannt. Ihr liegt das Phänomen zugrunde, dass Schüler Alltagswissen und Schulwissen in verschiedenen „Schubladen“ speichern, und so beispielsweise bei mathematischen Aufgaben (vgl. [SILV86], [VERS94]) für die Realität unsinnige Antworten geben.

Als dritte Erklärung für Träges Wissen wird letztlich die **Situiertheitserklärung** angegeben. Diese Erklärung beruht auf der Annahme, dass Wissen prinzipiell situativ gebunden ist, und insofern der Transfer auf neue Probleme immer Schwierigkeiten bereitet. Mit dieser Annahme der Kontextgebundenheit wird der „traditionelle Wissens- und Transferbegriff der kognitiven Psychologie in Frage gestellt“. [RENK96]

Träges Wissen gilt als bekanntes Problem. Seine lernpsychologische Ursache ist die Methode des Nürnberger Trichters, dessen Grundannahme lautet, dass jeder Lernstoff prinzipiell mit Sprache vermittelbar ist. Da der Lehrer weiß, was zu lernen ist, muss der Schüler es nur noch abspeichern und im Gedächtnis behalten. Je größer die vermittelte Stofffülle ist, desto erfolgreicher war der Lernprozess. [THIS97]

Auf Grund aktueller Forschungen in der Kognitionspsychologie ist inzwischen bekannt, dass erfolgreiches Lernen nicht eine Wissensansammlung, sondern das Verstehen von Wissen als Ziel aufweist. „Verstehen heißt, sich eine Interpretation aufzubauen, die in Situationen funktioniert.“ [THIS97] Daher wird die rein rezeptive Methode des Nürnberger Trichters stark angezweifelt und andere Lernsituationen angestrebt, die helfen, die rezeptive Schülerhaltung zu überwinden, die ebenfalls als Auslöser Trägen Wissens gesehen wird. [BRAN97] Bei Lernprozessen steht das wirkliche Verstehen, das produktive Denken (vgl. Kapitel 5.5.3) im Mittelpunkt, und somit die Vermeidung bzw. der Abbau Trägen Wissens.

Ein schülergerechtes Modell sollte daher möglichst selbständig von den Schülern erschlossen werden können. Denn wie ist Wissen beim Menschen repräsentiert?

5.4.4 Konzeptuelles Wissen und seine Repräsentanten

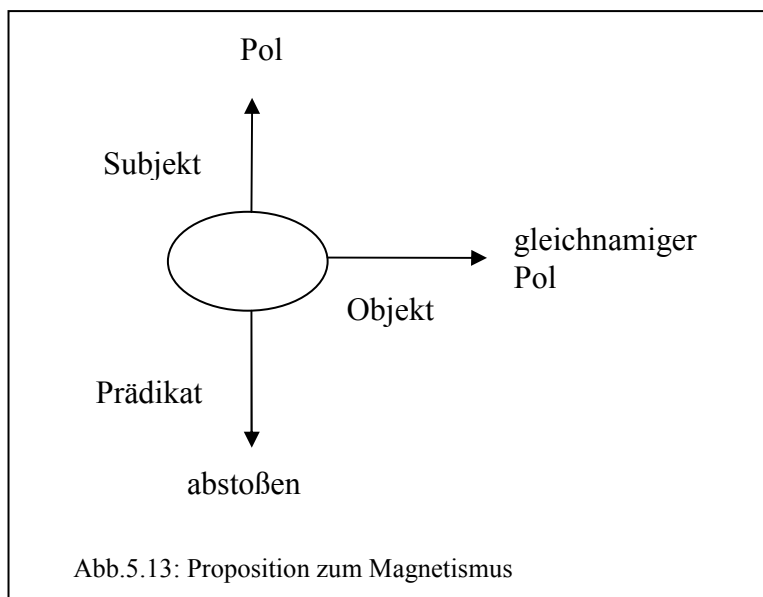
Die Kognitive Psychologie beschäftigt sich unter anderem mit der Repräsentation von Wissen beim Menschen, und unterscheidet hier zwischen der *wahrnehmungsbasierten* und der *bedeutungsbezogenen* Repräsentation. Bedeutungsbezogene Repräsentation bezeichnet das Vorgehen, bei dem nur das *Bedeutsame* herausgefiltert wird und belanglose Details weggelassen werden.

Das entsprechende Wissen, das sich der Mensch konstruiert, wenn er von Einzelheiten und Details absieht, und nur allgemeine Merkmale einer Klasse kategorisiert, dieses Wissen über Konzepte, bezeichnet man als **konzeptuelles Wissen**.

Grundbaustein des Konzeptuellen Wissens sind so genannte Propositionen, das sind kleinste Wissenseinheiten, die sich sinnvoll als wahr oder falsch beurteilen lassen. Man kann sie als Mini-Aussage auffassen, die häufig aus „Subjekt - Prädikat - Objekt“ aufgebaut ist. Solch eine Proposition könnte beispielsweise zu folgendem Satz so aussehen.

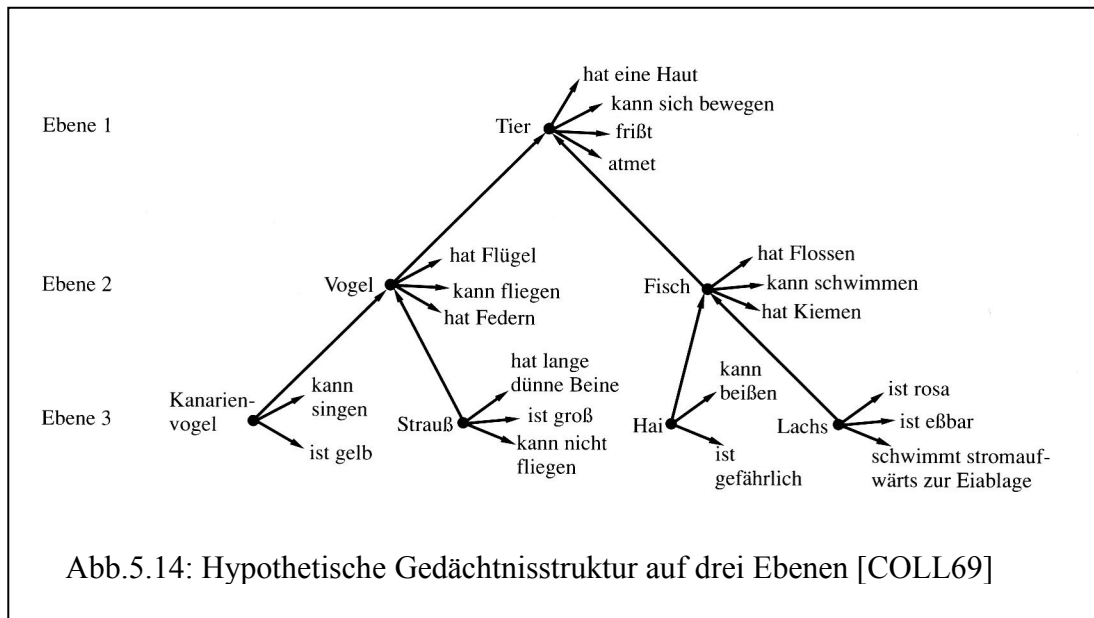
Satz: „Ein Pol stößt einen gleichnamigen Pol ab.“

Proposition:



Das konzeptuelle Wissen lässt sich generell in zwei verschiedenen Weisen repräsentiert, zum einen in Form *semantischer Netzwerke* und zum anderen in Form von *Schemata*. Im Folgenden wird erläutert, wie diese beiden Repräsentanten funktionieren.

Semantische Netzwerke lassen sich nach Collins und Quillian [COLL69] als eine Menge von Konzepten bezeichnen, die in einer hierarchischen Struktur angeordnet sind. Abbildung 5.14 verdeutlicht dies.



Konzepte sind in dieser Abbildung beispielsweise Kanarienvogel, Strauß, Vogel und Tier. Die Verknüpfung zwischen Konzepten verschiedener Ebenen erfolgt jeweils mit einer isa-Verbindung. (isa = is_a (eng.) = ist ein) Ein Kanarienvogel „is a“ Vogel, ein Vogel „is a“ Tier. Jedes Konzept ist zudem mit jeweils passenden Eigenschaften verbunden, wobei die Eigenschaften einer höheren Ebene auch für die darunter liegenden Ebenen zutreffen. Dabei gibt es allerdings auch Ausnahmen, beispielsweise, dass der Strauß ein Vogel ist, aber nicht die Eigenschaft des Fliegens für ihn abgespeichert werden darf. [ANDE96]

Diese semantischen Netzwerke alleine genügen nicht, um konzeptuelles Wissen über Klassen von Sachverhalten zu repräsentieren. In Form von Schemata ist Wissen über Konzepte in einer aufzählenden Weise von Eigenschaftskriterien, *Slots*, und deren Ausprägung gespeichert. In der Abbildung 5.15 sind für das Konzept „Haus“ die Slots und dahinter deren Ausprägungen aufgeführt.

Haus

- *Oberbegriff*: Gebäude
- *Teile*: Zimmer
- *Material*: Holz, Stein
- *Funktion*: Wohnraum des Menschen
- *Form*: rechteckig, dreieckig
- *Größe*: zwischen 10 und 1000 Quadratmetern

Abb.5.15: Schematarepräsentation [ANDE96]

Wenn typische Ausprägungen angegeben sind, bezeichnet man diese Werte als *Default-Wert*. Es gehört sogar zu den Kriterien eines Schemas, für bestimmte Slots solche Default-Werte anzunehmen. Forschungen von Brewer und Treyens (1981) haben gezeigt, dass Menschen automatisch die Default-Werte einem Konzept zuordnen, solange sie nicht insbesondere etwas anderes ausfindig machen. [BREW81]

Beim Vogel Strauss müsste demnach der Default-Wert beim Slot „Fortbewegungsmöglichkeiten“ mit „kann nicht fliegen“ überschrieben werden.

Die beiden Wissensrepräsentanten, Schemata und Netzwerk, ermöglichen eine beschleunigte Einordnung von Informationen und Vorhersagen von Sachverhalten.

Um zu analysieren, ob eine Vorgehensweise im Unterricht schülergerecht ist, ist es sinnvoll und unabdingbar, die strukturellen Grundlagen der generellen Wissensrepräsentation zu kennen. Denn nur auf dieser Basis kann und darf geschlussfolgert werden, ob für Schüler beim Assimilieren und Akkomodieren neuer Sachverhalte Schwierigkeiten unausweichlich oder vermeidbar sind.

Auf Grund dieser Repräsentation von Wissen ist es auch nahe liegend, dass die Verknüpfung von Wissen eine große Bedeutung spielt. Je multipler Wissen verschlüsselt wurde, je mehr semantische Verknüpfungen es gibt, desto besser kann es auch wieder abgerufen werden.

Ein chinesisches Sprichwort besagt:

Sage es ihm, und er vergisst es.

Zeige es ihm, und er behält es.

Beziehe ihn als Person mit ein, und er versteht es.

[HEIN94a]

5.5 Zielgerechte Elementarisierung

Eine Elementarisierung muss nicht nur fachgerecht und schülergerecht sein, sondern auch zielgerecht. Das bedeutet, dass neben den fachlichen Strukturen und den internen psychischen Strukturen auch *allgemeine Zielvorstellungen* des Physikunterrichts zu berücksichtigen sind. Deshalb wird im Folgenden ein Überblick über die verschiedenen Ziele des Faches Physik gegeben. Dabei wird insbesondere auf die Fähigkeit des Denkens im Physikunterricht eingegangen.

Die Ziele des Physikunterrichts lassen sich in vier Zielklassen untergliedern: Konzeptziele, Prozessziele, Soziale Ziele und Ziele über Einstellungen und Werte. [KIRC00]

5.5.1 Konzept- und Prozessziele

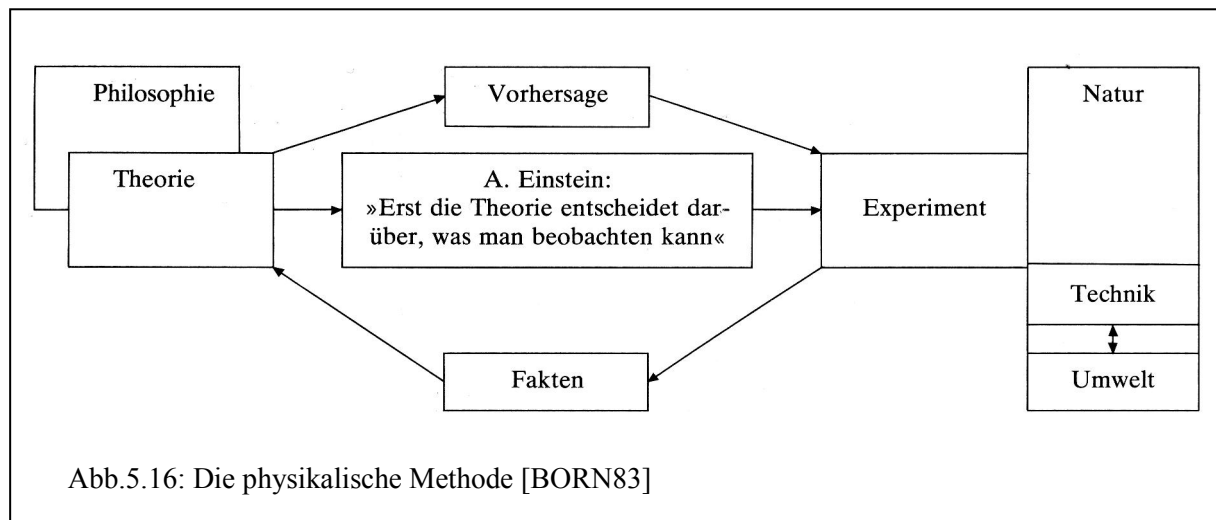
Konzeptziele beziehen sich auf die physikalischen Kenntnisse, auf Fakten und Theorien, Begriffe und das Verstehen von Zusammenhängen. Die geforderten Fachkenntnisse sind im Curriculum (vgl. Kapitel 4.1) festgelegt, und werden meist von den Schulen durch ein schulinternes Curriculum spezifiziert.

Mit Prozesszielen sind im Gegensatz zu den Konzeptzielen die physikalischen Fertigkeiten und Fähigkeiten gemeint. Insbesondere ist damit die physikalische Methode miteinbezogen. Diese wird nun genauer erläutern.

Physiker verstehen sich selber als „Übersetzer“ der Wirklichkeit in Modelle und mathematische Darstellungen.

„Insgesamt kann die Physik als die Wissenschaft angesehen werden, die die (...) Naturvorgänge mit gedanklichen Bildern, d. h. mit physikalischen Modellen und Theorien möglichst weitgehend widerspruchsfrei und einheitlich zu beschreiben versucht.“ [BORN83]

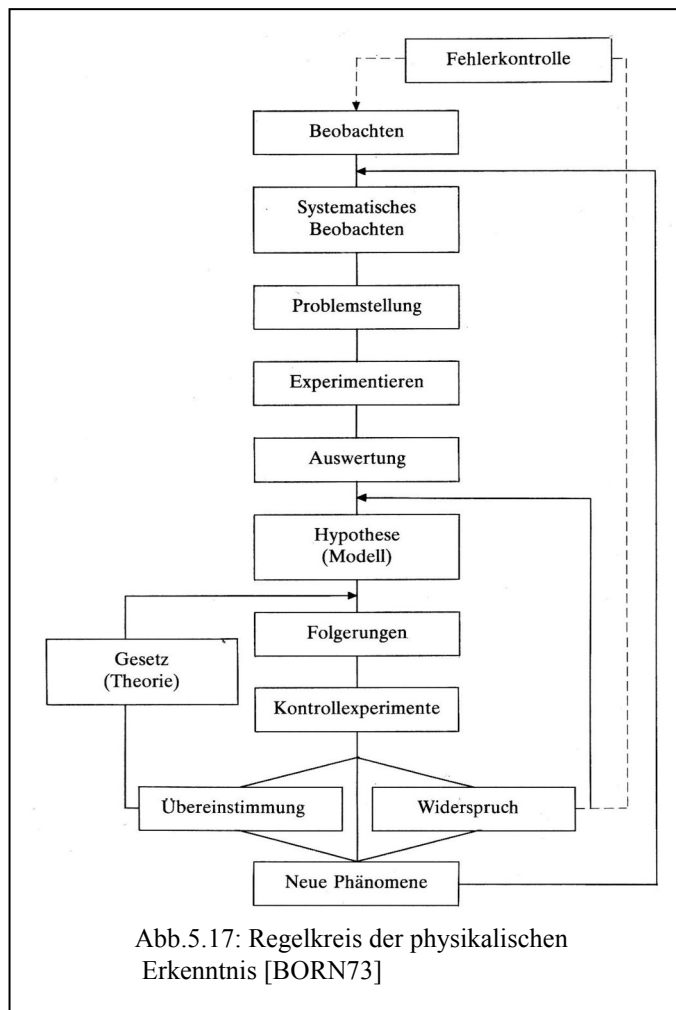
Betrachtet man die Abbildung 5.16, so wird die physikalische Methode deutlich.



Die Philosophie hat Vorstellungen von der Welt, daraus entsteht gedanklich - häufig durch Symmetrieüberlegungen - eine Theorie in Form einer Hypothesenbildung mit einer theoretischen Vorhersage. Diese kann mittels eines Experimentes überprüft werden.

Daraus resultieren Fakten, die dann der Theoriebildung dienen. Dieser Regelkreis kann mehrfach bis zum Erhalt einer Theorie durchlaufen werden.

Einstein fügt in diesem Regelkreis noch den wichtigen Hinweis ein, dass man zur Deutung des Experimentes bereits Theorien benötigt. „Sieht man z. B. durch ein Fernrohr statt des runden Mondes einen Mondberg, so wird dieser Widerspruch von Optik und Mechanik erklärt.“ [BORN83]



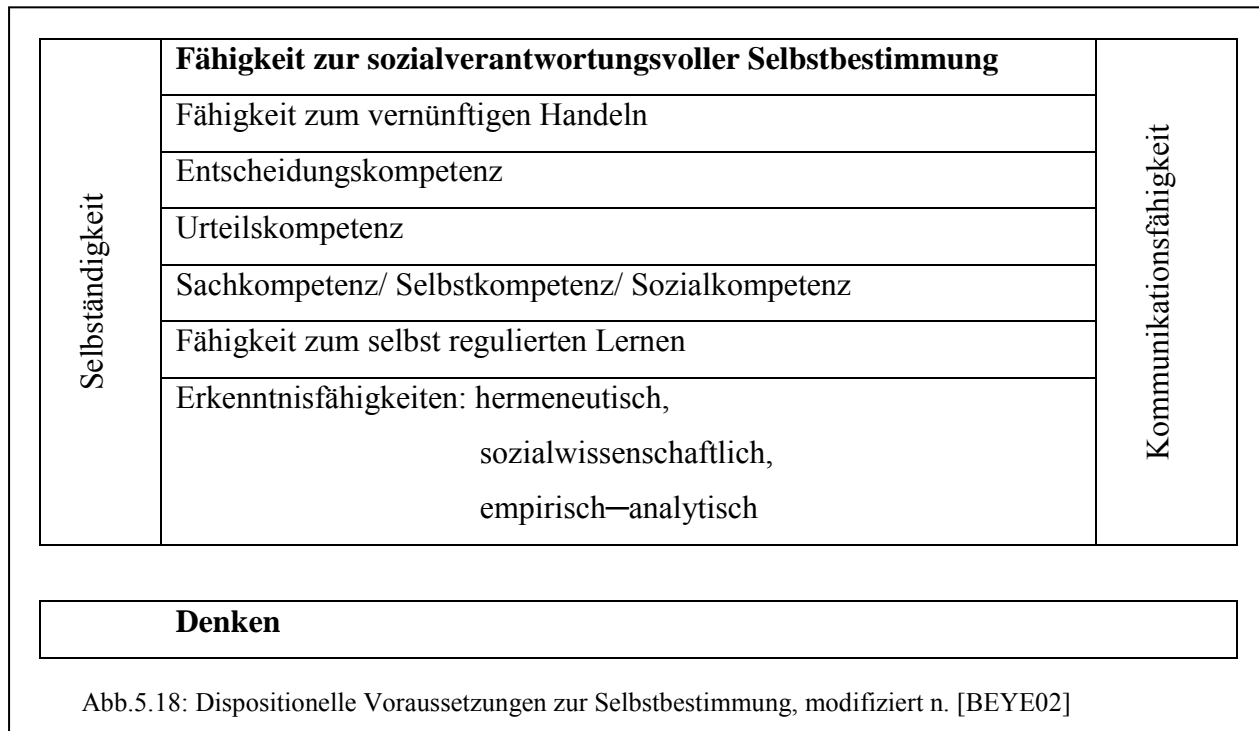
Eine andere Darstellungsweise des Regelkreises der physikalischen Erkenntnis ist in der Abbildung 5.17 dargestellt. Sie verdeutlicht sehr schön das Zusammenspiel gedanklicher und experimenteller Leistung.

Diese physikalische Vorgehensweise wird im Physikunterricht zur Erprobung des alternativen Elementarmagneten-Modells wieder aufgegriffen. (vgl. Kapitel 8.4)

5.5.2 Soziale Ziele

Von den Konzept- und Prozesszielen, die guter Physikunterricht erfüllen soll, wird nun zu den Sozialen Zielen¹⁵ übergeleitet. „Soziale Ziele formulieren wünschenswertes, sinnvolles und nützliches Verhalten in der Gesellschaft“. [KIRC00] Übergeordnet und fachunabhängig ist das höchste Ziel des Unterrichts [BEYE02], die „Fähigkeit zur sozialverantwortungsvollen Selbstbestimmung“ der Schüler auszubilden. In der nachfolgenden Abbildung steht daher dieses Ziel an der obersten Position.

¹⁵ Zu den „Sozialen Zielen“ werden hier auch die „Ziele über Einstellungen und Werte“ gezählt, da sie ebenso dem Bild des mündigen Bürgers entsprechen.



Die Abbildung 5.18 ist so aufgebaut, dass jedes Feld die Voraussetzung für das darüber liegende Feld angibt. Um also das hehre Ziel der „sozialverantwortliche Selbstbestimmung“ zu erlangen, benötigt der Schüler dispositionelle Voraussetzungen. Zuerst einmal fußt die Selbstbestimmung auf der „Fähigkeit zum vernünftigen Handeln“, die ihrerseits als Voraussetzung die „Entscheidungskompetenz“ benötigt. Ihr wiederum liegt aber die „Urteilskompetenz“ zu Grunde. Urteilen seinerseits kann man nur aufgrund von „Sach-, Selbst- und Sozialkompetenz“. Diese Kompetenzen kann man wiederum nur dann erlangen, wenn man die „Fähigkeit zum selbst regulierten Lernen“ besitzt. Dazu benötigt man jedoch die „Erkenntnisfähigkeiten in dem hermeneutischen, sozialwissenschaftlichen und empirisch-analytischen Bereich“. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass bei diesem ganzen Prozess die „Selbständigkeit“ und die „Kommunikationsfähigkeit“ vertikale, stetig mehr benötigte, voraussetzende Kompetenzen sind. [BEYE02]

Grundlage für diese Erziehung, die dem Schüler die Selbstbestimmung ermöglicht, ihn in seiner Persönlichkeitsentwicklung fördert, ist letztlich seine Fähigkeit des **Denkens**. In der Darstellung nach Beyer (2002) wurde daher diese Fähigkeit als Fundament positioniert. Zur zielgerechten Elementarisierung muss folglich ein Modell insbesondere das Denken fördern.

5.5.3 Produktives Denken im Physikunterricht

Denken? Denken ist eine Form der Erkenntnisgewinnung, etwas Dynamisches. Es gibt zwei gegensätzliche Theorien über die Struktur der Denkverläufe, die Struktur der „traditionellen Logik“ und die Struktur der „Assoziationstheorie“. [KLIX02]

Die Ansicht der „traditionellen Logik“ bezieht sich auf eine Sicht „von oben“, vom Ziel des Denkvorganges her, wohingegen die Ansicht der „Assoziationstheorie“ auf der Sicht „von unten“, aus Assoziationen zwischen Gedächtnisinhalten (Reiz - Reaktion), fußt.

Die Gestaltschule (v.a. Wertheimer, Köhler, Lewin) übt Kritik an dem zu abstrakten, zu logischen Ansatz der traditionellen Logik, und an dem bloßen „Schema-F“ Lernen der Assoziationstheorie. Sie hat letztlich eine Art Synthese dieser beiden Zugänge entwickelt. Wertheimer formuliert, dass die „Spannung zwischen dem Gegebenen und dem Geforderten“ den Denkvorgang zur Lösung hin treibt, die häufig mit einem „Kippen“, mit plötzlicher Einsicht einher tritt. [KLIX02]

Er beschreibt Denken im Gegensatz zum „Schema-F-Lernen“ als einen Prozess des *einsichtigen* Denkens, des *lebendigen und selbständigen* Denkens, als eine „*lebendige Auseinandersetzung mit der Sache*“ [WERT64], als einen Prozess des Gewinnens eigener Einsichten. Lässt sich ein Schüler von seinen eigenen Einsichten führen, so erreicht er die geistige Eigenständigkeit. Diese Art des Denkens bezeichnet Wertheimer als *produktives Denken* (lat. producere: vorwärts dringen/ weiterführen). [WERT64]

Produktives Denken liegt im Gegensatz zu *reproduktivem* Denken dann vor, wenn die Lösung nicht aus dem Gedächtnis heraus verfügbar war. Insbesondere geht produktives Denken *nicht* schematisch, strukturblind, atomistisch, stückhaft, ziel- oder planlos vor. Wichtig und notwendig für echtes produktives Denken sind strukturvolle, die Gesamtheit erfassende, logische Schlüsse, die nicht einengen, nicht blind - im Sinne der traditionellen Logik - agieren, sondern die Dynamik im Denken sehen und sinnhaft vorgehen. Denken, im Sinne des produktiven Denkens, soll bei den Schülern gefördert werden. [WERT64]

Dieses Denken geht häufig einher mit einem „Aha-Erlebnis“. Plötzlich sieht man die Lösung. Die Lösung ist oft einfacher als erwartet und ergibt sich oft durch Zufügen eines Teiles zu einem Ganzen, zu einer „Gestalt“¹⁶. Häufig spielen Symmetrien bei der Auffindung der Lösung eine entscheidende Rolle¹⁷.

Aus der Theorie des produktiven Denkens resultieren drei Hinweise für den Physikunterricht. [BORN83]

1. Entscheidend für diesen Prozess des produktiven Denkens ist eine „entspannte Atmosphäre“. Nur in ihr kann der Schüler spielerisch neue Ideen entwickeln und sich trauen, scheinbar fremde Gegenstände in seine Forschung mit einzubeziehen.
2. Der Lehrer hat die nicht leichte Aufgabe, die Balance zu halten zwischen „Hinweise geben“ und „Hinweise nehmen“. Gibt er zu viele Hinweise, dann würden die Schüler nicht das freudige „Aha-Gefühl“ erleben. Nimmt er hingegen zu viele Informationen, würden die Schüler überfordert.
3. Beim Festhalten von Resultaten ist nicht die mathematisch kürzeste Lösung immer die einsichtigste. Daher sollte man stets die Formulierung wählen, die den „Gang der Entdeckung“ am klarsten wiedergibt. [BORN83]

Letztlich ist es sinnvoll, diese Hinweise zu beachten, um möglichst sinnstiftende Denkprozesse bei den Schülern zu fördern. Insofern sind Elementarisierungen für Modelle dann zielgerecht, wenn sie durch ihre Art und Weise solch produktives Denken geradezu fördern und fordern.

¹⁶ daher der Namensursprung: Gestaltschule

¹⁷ Galileis Entdeckung des Trägheitssatzes (vgl. [WERT64])

5.6 Kriterien im Überblick

Ist das Modell fachgerecht?

- Ist das Modell physikalisch „richtig“?
- Baut das Modell auf den physikalischen Grundlagen stringent und logisch (nach den Produktionsregeln des Problemlösens [Kapitel 5.3.1]) auf?
- Ist das Modell physikalisch erweiterbar?

Ist das Modell schülergerecht?

- Knüpft das Modell an den mentalen Modellen ([Kapitel 5.4.1]) der Schüler an?
- Kann das Modell vom Schüler entwicklungspsychologisch ([Kapitel 5.4.2]) schon in der Jahrgangstufe 6 erfasst werden?
- Erfüllt das Modell die lerntheoretischen Folgerungen, die aus den Theorien zum Tragen Wissen ([Kapitel 5.4.3]) entstanden sind?
- Können für den Schüler bei der Adaption dieses Modells auf Grund der kognitiven Repräsentation des Wissens ([Kapitel 5.4.4]) Schwierigkeiten auftreten?

Ist das Modell zielgerecht?

- Fördert das Modell die Konzept- und Prozessziele ([Kapitel 5.5.1])?
- Fördert das Modell die Sozialen Ziele ([Kapitel 5.5.2])?
- Fördert das Modell das Produktive Denken ([Kapitel 5.5.3])?

6. Kapitel

Analyse der zwei Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells

Die drei Kriterien („fachgerecht“, „schülergerecht“ und „zielgerecht“), anhand dessen die beiden Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells analysiert werden, wurden im vorherigen Kapitel ausgiebig dargestellt. Zur Analyse wird nun zuerst das Bewertungsschema dargestellt, und anschließend die beiden Varianten des klassischen Elementarmagneten-Modells „freie Bewegung“ (siehe Kapitel 4.3.1) und „drehbare Fixierung“ (siehe Kapitel 4.3.2) anhand dieses Schemas untersucht.

6.1 Bewertungsschema

Beide klassischen Elementarmagneten-Modelle werden anhand der drei Kriterien „fachgerecht“, „schülergerecht“ und „zielgerecht“ auf ihre Brauchbarkeit hin überprüft. Um einen genauen Überblick über die Vor- und Nachteile der Modelle zu erhalten, wird für jedes Kriterium eine Punktzahl vergeben, die maximal +2 und minimal -2 betragen kann. Die vergebenen Punkte für die drei Kriterien werden anschließend addiert und ein Modell mit der höheren Punktezahl ist besser geeignet als eins mit einer niedrigeren Punktzahl. (Von Modellen mit negativer Punktzahl ist eher abzuraten, Modelle mit positiver Punktzahl sind eher zu empfehlen.) Da jedes der drei Kriterien seine Berechtigung hat (vgl. Kapitel 5.2) und keines der Kriterien gegenüber den anderen vorgezogen wird, werden die Punktzahlen nicht verschieden gewichtet, sondern schlichtweg mit eins skaliert und addiert.

Punkte:	+2	+1	0	-1	-2
Wirkungen:	Sehr positiv	positiv	neutral	negativ	sehr negativ

6.2 Zum klassischen Modell I (Freie Bewegung)

6.2.1 Analyse - fachgerecht

Da der Magnetismus, und insbesondere der in der Jahrgangstufe 6 behandelte Ferromagnetismus, ein quantenmechanisches Phänomen darstellt, lässt er sich auf Grund der hohen Komplexität natürlich nicht als solches in der Klasse 6 erklären. Wie im Kapitel 5.3 dargestellt, geht es darum, dieses Phänomen möglichst physikalisch richtig und plausibel, an physikalisches Vorwissen andockend und erweiterbar, mit einem Wort „fachgerecht“, in einem Modell darzustellen.

Die klassische Modellvariante I (Freie Bewegung) ist jedoch nicht fachgerecht, da sie im innerphysikalischen Widerspruch zu den vorher gelernten physikalischen Grundlagen und korrekten physikalischen Regeln steht.

Diese zwangsläufig zuvor erworbenen Produktionsregeln (vgl. Kapitel 5.3.1) lauten:

- „Wenn sich zwei gleichnamige Pole gegenüberstehen [Bedingung], dann stoßen sie sich ab [Aktion].“
- „Wenn sich zwei ungleichnamige Pole gegenüberstehen [Bedingung], dann ziehen sie sich an [Aktion].“

Dieses Modell I berücksichtigt diese Produktionsregeln nicht, obwohl sie die Basis der Problemlöseoperatoren darstellen. Denn unter Berücksichtigung derselben würden die frei beweglichen Elementarmagnete nicht in der dargestellten Position (siehe Abbildung 6.1) verweilen.

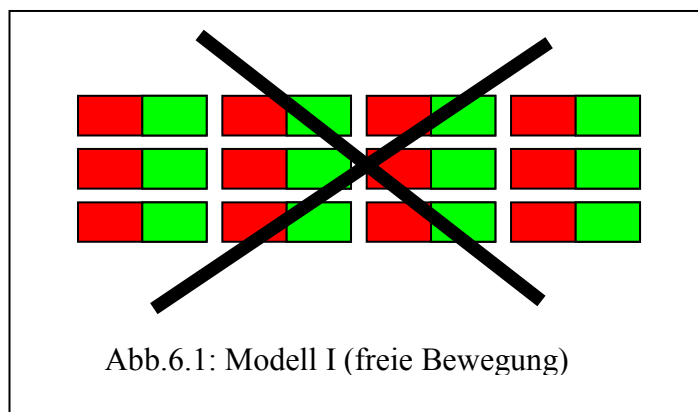
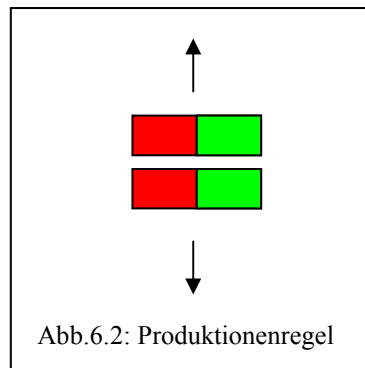
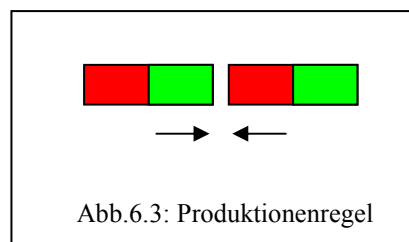


Abb.6.1: Modell I (freie Bewegung)

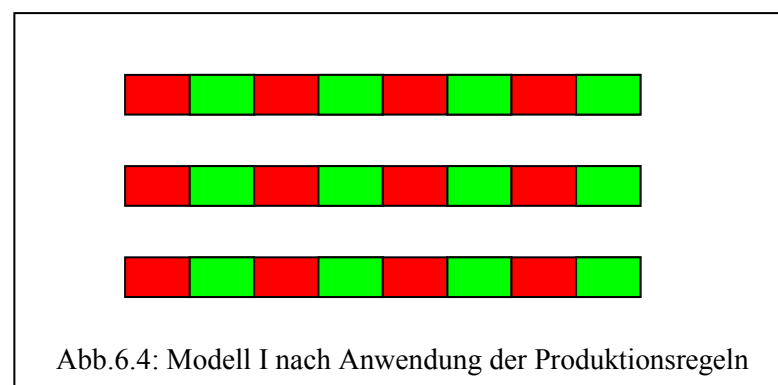
Die frei beweglichen Elementarmagnete, die mit ihren gleichnamigen Polen einander gegenüber liegen, würden sich nach den Produktionsregeln gegenseitig abstoßen, wie in Abbildung 6.2 dargestellt ist.



Ebenso würden sich die frei beweglichen Elementarmagnete, die mit ihren ungleichnamigen Polen einander gegenüber liegen (siehe Abbildung 6.1), nach den Produktionsregeln gegenseitig anziehen, wie in Abbildung 6.3 dargestellt ist.



Demzufolge würden die frei beweglichen Elementarmagnete nicht in der im Modell I abgebildeten Lage (siehe Abbildung 6.1) verbleiben, sondern sich, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, positionieren.



Da sich das Kriterium fachgerecht durch das Begriffspaar „fachlich richtig — fachlich falsch“ (vgl. Kapitel 5.3.1) relativieren lässt, muss das Modell I eindeutig als fachlich falsch bewertet werden. Solch ein widersprüchliches und die physikalischen Grundlagen erschütterndes Modell ist nicht fachgerecht. Zudem kann es auch nicht fachgerecht erweiterbar sein, da es, für sich betrachtet, schon widersprüchlich ist.

Somit lässt sich mit diesem Modell I der absoluten Bewegungsfreiheit der Elementarmagnete die Anordnung der Elementarmagnete im Inneren eines Magneten bzw. eines ferromagnetischen Stoffes nicht erklären. Das Modell I bezieht sich somit nicht folgerichtig und stringent auf die zu Grunde liegenden physikalischen Grundlagen und erhält demnach für das Kriterium fachgerecht die minimale Punktzahl von -2.

6.2.2 Analyse - schülergerecht

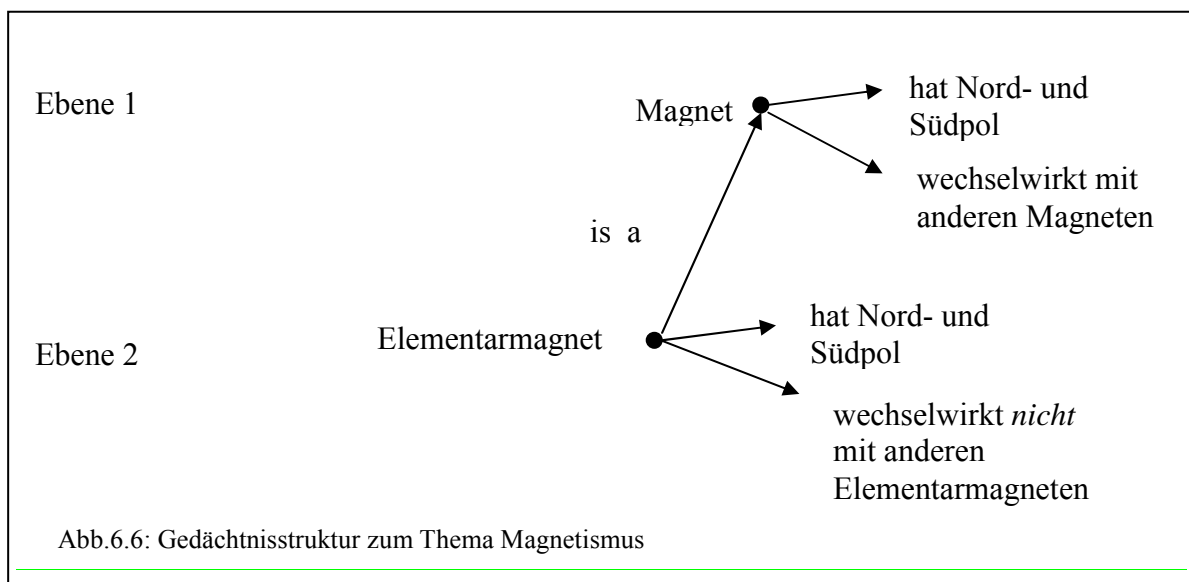
Die Modellvariante I (freie Bewegung) ist auch nicht schülergerecht, da die Schüler nicht bei ihren Vorerfahrungen und mentalen Modellen abgeholt werden. Die zuvor zwangsläufig im Unterricht erarbeiteten physikalischen Zusammenhängen, letztlich die unter Kapitel 6.2.1. aufgeführten Produktionsregeln, bleiben bei diesem Modell vollkommen unberücksichtigt und stehen sogar in einem offensichtlichen physikalischen Widerspruch zu dem Modell I.

Dies hat kognitiv zur Folge (vgl. Kapitel 5.4.3), dass sich bei den Lernenden keine neuen, semantischen Netzwerke ausbilden können. Schlimmstenfalls wird sogar korrektes Wissen mit fehlerhaftem überschrieben oder es kommt zu einer Koexistenz, es bildet sich bruchstückhaftes Wissen, das nicht in einen Wissenskontext (Vorwissen oder mentales Modell) eingebunden ist.

Neben dieser Tatsache, dass das Modell I die Schüler nicht bei ihren mentalen Modellen abholt, können sich die Schüler dieses Modell, eben weil es nicht fachgerecht auf den zuvor erarbeiteten physikalischen Grundlagen fußt, auch nicht selbständig logisch erschließen. Daher kann man als Lehrer dieses Modell I nur nach der Nürnberger Trichter Methode vermitteln. Dessen unzureichende Nachhaltigkeit und mangelnde Effektivität wurde bereits in Kapitel 5.4.3 thematisiert. (vgl. [EDEL00])

Wünschenswerte Lernprozesse, bei denen die Lerninhalte in sinnstiftenden Zusammenhängen miteinander vernetzt werden und sich der Schüler den neuen Stoff erschließen kann, verwehrt das Modell I. Folglich wird der Schüler geradezu daran gehindert, tiefenorientierte Lernstrategien anzuwenden. Er kann sich mittels Modell I seinen Lernstoff nicht selber organisieren. Es wird ihm erschwert, sein Verständnis selbständig zu überwachen und wahrscheinlich lernt er strukturell blind dieses Modell I auswendig.¹⁸ Bei Schülern kann es so zur Ausbildung von Trägern Wissen (vgl. Kapitel 5.4.3) kommen, in diesem Fall primär zu Trägern Wissen aufgrund von „Strukturdefizit-erklärungen“ [RENK96] Dieses Strukturdefizit liegt im konzeptuellen Wissen. Aus Kapitel 5.4.4 ist bekannt, dass Personen automatisch die Default-Werte einem Konzept zuordnen, solange sie keine Änderung ausfindig gemacht haben. Bei diesem Modell I ordnen sie somit den Default-Wert von Ebene 1 „wechselwirkt mit anderen Magneten“ auch automatisch der „Ebene 2: Elementarmagnet“ zu. Und genau an dieser Stelle liegt das Defizit dieser Gedächtnisstruktur.

Dieser Default-Wert „wechselwirkt mit anderen Magneten“ müsste nämlich, wie in der Abbildung 6.6 geschehen, auf der 2. Ebene mit dem Wert „wechselwirkt im Modell I *nicht* mit anderen Elementarmagneten“ überschrieben werden, damit das Modell I keinen inneren Konflikt bzw. Widerspruch hervorruft.



¹⁸ Umfragen und Interviews mit Schülern des Physik LKs im Vorfeld dieser Dissertation ergaben, dass sie das Modell I wiedergeben konnten, aber – auf den innerphysikalischen Widerspruch aufmerksam gemacht – irritiert und verwirrt waren. Sie hatten das Modell folglich ohne weiteres Hinterfragen strukturell blind adaptiert.

Oder, in der anderen Wissensrepräsentation „Schemata“ (siehe Kapitel 5.4.4), wurde der Default-Wert zum Slot „Wechselwirkt“ beim Elementarmagnet nicht mit dem kursiv gedruckten Wert wie in Abbildung 6.7 überschrieben. (vgl. [ANDE96]). Insofern können, auf Grund der Repräsentation von Wissen durch das Übernehmen der Defaultwerte physikalische Schwierigkeiten oder ein strukturelles Übernehmen hervorgerufen werden.

Magnet

- Aufbau: Nord- und Südpol
- Wechselwirkt: mit anderen Magneten

Elementarmagnet

- Aufbau: Nord- und Südpol
- Wechselwirkt: *im Modell I nicht mit anderen Elementarmagneten*

Abb.6.7: Schemata zum Thema Magnetismus

Aufgrund dieser Tatsachen, dass das Modell I weder an mentalen Modellen anknüpft, noch lerntheoretisch mittels effektiver Methoden gelehrt werden kann, zudem den Aufbau Trägen Wissens geradezu heraufbeschwört, ist es nicht schülergerecht¹⁹. Das Modell I erhält somit auch für das Kriterium „schülergerecht“ die minimale Punktzahl von -2.

6.2.3 Analyse - zielgerecht

Argumentativ kommt man von der Überprüfung des Kriteriums „schülergerecht“ schnell zur Überprüfung des Kriteriums „zielgerecht“. Durch die Tatsache bedingt, dass das Modell I nicht mittels eigener Überlegungen erschlossen werden kann, sondern letztlich nur durch die Nürnberger Trichter Methode, können keine Bedingungen im Unterricht geschaffen werden, die ein produktives Denken nach Wertheimer (siehe Kapitel 5.5.3) fordern und fördern.

¹⁹Es bliebe zu überprüfen, ob dieses Modell I in Kombination mit der ausführlichen Besprechung seiner Grenzen (Aufzeigen des innerphysikalischen Widerspruches) als sinnvoll und methodisch wertvoll zu beurteilen ist.

Auf Grund der innerphysikalisch widersprüchlichen Struktur von Modell I kann man als Lehrer nicht dosiert Informationen geben, so dass Schüler das „Aha-Erlebnis“ der Einsicht und des Verstehens erleben. Es wird wohl auch keine entspannte Lernatmosphäre entstehen, da ein zu „kritisches“ Hinterfragen des vom Lehrer vorgestellten Modells wohl eher unerwünscht ist. Somit kann anhand dieses Modell I das Ziel, das Denken der Schüler zu schulen und zu verfeinern, nicht verfolgt werden.

Auch die Entwicklung der Schüler zu einem mündigen Bürger, die natürlich einen Prozess darstellt und immer nur stückweise vollzogen werden kann, wird mit diesem Modell I geradezu karikiert. Das Modell I fördert *nicht* das eigenständige, sinnstiftende und Zusammenhänge überblickende Denken, nein, im Gegenteil, die Schüler werden zum blinden Repetieren, zum oberflächigen, nicht hinterfragenden, unkritischen Umgang mit Fremdinformationen sogar geradezu erzogen. Modell I benötigt einen rezeptiven, strukturblinden, oberflächlichen und unkritischen Konsumenten.

Im eigenständigen Erarbeiten (vgl. Kapitel 8.4) schließen Schüler dieses Modell I aus logischen Gründen als mögliche Erklärung nämlich direkt aus. Dieses Modell I verfolgt somit genau das gegenteilige Ziel von Schule (vgl. Kapitel 5.5.2), in der nämlich ein wacher Blick und ein kritischer Umgang mit Informationen fokussiert werden und letztlich die Ausbildung zum kritisch hinterfragenden, und selbst bestimmten, handelnden Bürger.

Auf Grund dieser Fremdbestimmtheit, gepaart mit der Spekulation, dass auch der Lehrer dieses Modell nicht kritisch hinterfragt, sondern nur repetiert, erfüllt es keine allgemeinen Ziele der Schulbildung.

Auch die Prozessziele können mit diesem Modell I nicht verfolgt werden. Die physikalische Methode (siehe Kapitel 5.5.1) kann nicht nachvollzogen werden, und überhaupt bleibt der experimentelle Zugang den Schülern mit diesem Model I verschlossen, da sich in der physikalischen Praxis keine Magnete, wie in Modell I angegeben, verhalten würden. Maximal kann dieses Modell Träges Wissen fördern, was dem Anspruch von Konzeptwissen als Ziel nicht genügt. Insofern erhält das Modell I auch für das Kriterium „zielgerecht“ die minimale Punktzahl von -2.

6.2.4 Fazit

Das klassische Modell I (Freie Bewegung) ist weder fachgerecht, noch schüler- und zielgerecht. Es erhält in allen drei Kriterien die Minimalpunktzahl von -2 , und hat somit eine Gesamtpunktzahl von -6 . Dies ist die schlechteste Wertung, die ein Modell überhaupt erhalten kann. Somit ist dieses Modell I nicht zu empfehlen.

	fachgerecht	schülergerecht	zielgerecht	Summe
Freie Bewegung	-2	-2	-2	-6

6.3 Zum klassischen Modell II (Drehbare Fixierung)

6.3.1 Analyse - fachgerecht

Das Modell II (Drehbare Fixierung) ist fachgerecht, da es die Elementarmagnete als ortsgebunden darstellt, die sich jeweils in Wechselwirkungen mit den anderen Elementarmagneten und dem äußeren Magnetfeld ausrichten können.

Dieses Modell fußt folgerichtig auf den Operatoren und Produktionsregeln des Problemlösens (siehe Kapitel 6.2.1), und lässt sich somit aus den physikalischen Grundlagen herleiten. Die Herleitung ist zwar nicht trivial (siehe Kapitel 6.3.2), aber sie lässt sich physikalisch widerspruchsfrei durchführen.

Diese Variante II des klassischen Modells ist zudem erweiterbar. Die Elementarmagnete können später als magnetischer Dipol eines Atoms aufgefasst werden. Und die Anordnung der Elementarmagnete in der vorgegebenen Raumgitterstruktur entspricht somit schon einer möglichen Anordnung der Atome in einem Molekül.

Wenn im Rahmen der Atomphysik der Aufbau eines Atoms aus Kern und Elektronen behandelt wird, und das Bohr'sche Atommodell, sowie später eine kugelsymmetrische Aufenthaltswahrscheinlichkeit, dann lässt sich daran anschließend das magnetische Moment eines Atoms auch näher spezifizieren.

Das magnetische Moment kann dann in seinen Beitrag vom Kern (Kernmoment) sowie in seine Beiträge der Elektronen der Hülle (Bahn- und Spinmoment) zerlegt werden. (siehe Kapitel 3). Auf Grund dieser möglichen Erweiterbarkeit erfüllt das Modell II die Kriterien für die Bezeichnung „fachgerecht“ und erhält somit die maximale Punktzahl von +2.

6.3.2 Analyse - schülergerecht

Diese Variante der drehbaren Fixierung ist jedoch kaum schülergerecht, da sie die Schüler nicht bei ihren mentalen Modellen und ihrem Alter entsprechenden Vorstellungen abholt, sondern ihnen die Theorie der Raumgitterstruktur überstülpt.

Forschungen von Erickson (siehe Kapitel 5.4.1), deren Probanden in der gleichen Altersklasse sind wie die Schüler der Jahrgangsstufe 6, zeigten, dass solch eine Raumgitterstruktur nicht in ihrem Erfahrungshorizont liegt.

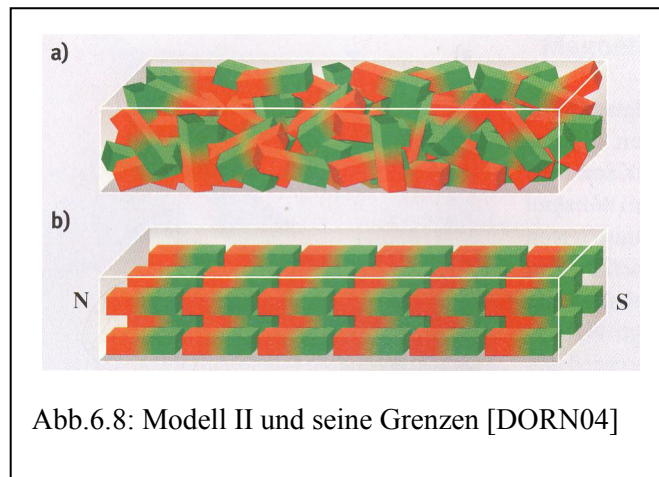
Nach der Entwicklungstheorie von Piaget und Studien von Nachtigall (siehe Kapitel 5.4.2) sind die Schüler der Jahrgangsstufe 6 größtenteils in der konkret-operationalen Entwicklungsstufe, und in dieser Stufe ist die Kompetenz des abstrakten Denkens, welches für das Modell II benötigt wird, noch nicht ausgebildet.

Auch eigene Erfahrungen der Autorin im Mathematikunterricht der Stufe 13 (also sieben Jahre später!) belegen, dass viele Schüler in dieser größtenteils formaloperativen Entwicklungsstufe noch große Schwierigkeiten haben, aus einem 3-dimensionalen kartesischen Koordinatensystem, das 2-dimensional abgebildet ist, Koordinatenpunkte abzulesen.

Insofern bleibt es sehr fraglich, ob sich die Schüler der Jahrgangsstufe 6 im 3-Dimensionalen diese um ihr jeweiliges Zentrum kreisende, und in der Raumgitterstruktur fixierten, Elementarmagnete wirklich vorstellen können. Zudem muss diese Überlegung abstrakt bleiben, da sie sich nicht in Form eines gegenständlichen Modells des theoretischen Modells (Kapitel 5.1) nachgebaut lässt, da solch eine zentrierte Fixierung in der physikalischen Praxis nicht konstruierbar ist²⁰.

²⁰ In 3 Dimensionen ist ein Nachbau unmöglich, eine möglicherweise verkürzte Variante in 2 Dimensionen wäre praktikabel.

Ikonisch wurde dieses Modell II genauso wie das Modell I dargestellt, so dass daraus die Fixierung im jeweiligen Zentrum nicht ersichtlich wird. Zudem hält die Darstellung von Modell II (siehe Abbildung 6.8) auch keiner genauen Analyse bezüglich der Positionierung der jeweiligen Elementarmagneten-Zentren stand, da die Elementarmagnete nicht mittig fixiert, sondern lediglich unwillkürlich angeordnet wurden.



Die Schüler können sich somit mittels dieser Abbildung die benötigte Raumgitterstruktur nicht eigenständig erschließen. Und da nach den beschriebenen Forschungen der mentalen Modelle zum Magnetismus (siehe Kapitel 5.4.1) den Schülern auch diese Vorstellungen fehlen, müssten sie den Prozess der Akkomodation absolvieren, dessen Schwierigkeiten bereits in Kapitel 5.4.2 thematisiert wurde. (Somit wird die Vermittlung des Modells II letztlich höchstwahrscheinlich auf die Methode des Nürnberger Trichters hinauslaufen. (siehe Kapitel 6.3.3))

Dieser Ansatz der Raumgitterstruktur ist somit entwicklungspsychologisch nicht erstrebenswert, da die Entwicklung des physikalischen Denkens nicht wesentlich beschleunigt werden kann und sollte, wie ausführlich in Kapitel 5.4.2 dargelegt wurde.

Zudem ist neben dieser komplexen Grundlage der Raumgitterstruktur auch der weitere Erklärungsprozess mittels des Modells II nicht trivial.

Als nächstes müssten bei diesem Modell die Wechselwirkungskräfte der Elementarmagnete mit den Schülern der Jahrgangsstufe 6 thematisiert werden. Aber der Kraftbegriff, insbesondere die Kräfteaddition und Resultierende, wird erst in den Jahrgangsstufe 9 und 10 behandelt. [KULT93]

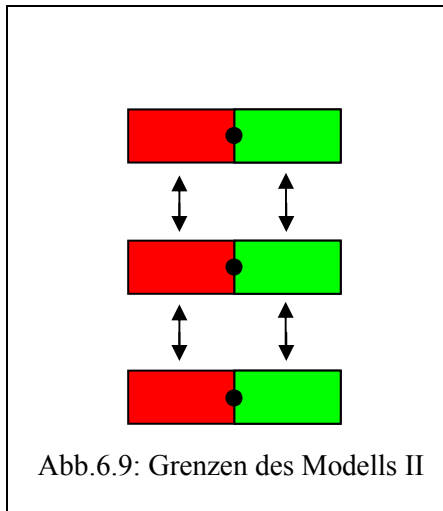
So müsste man an Vorerfahrungen, vielleicht vom Tauziehen oder Ähnlichem, anknüpfen, und eine Vorstellung von verschiedenen Kräften erzeugen. Wenn an der einen Seite des Taus eine große, starke Person zieht, und an der anderen Seite nur eine kleine, schwache, dann wissen die Schüler aus ihrer Lebenswelterfahrung, dass erstgenannter gewinnen wird. Wenn jetzt mehrer kleine, schwache sich vereinigen, dann ist der Ausgang des Tauziehens schon nicht mehr so vorhersehbar. So oder ähnlich könnte man versuchen, den Schülern das Modell II näher zu bringen.

Betrachten wird nun beispielsweise in der Abbildung 6.8 b) der Elementarmagnet in der oberen Ebene ganz rechts mittig, während ein großer, starker Magnet diesem ferromagnetischen Stoff von rechts mit dem gleichnamigen Pol genähert wird.

Dieser beschriebene Elementarmagnet erfährt nun verschiedene Kräfte, zum einen von diesem großen angenäherten Magnet, und zum anderen von den vielen kleinen ihn umgebenden Elementarmagneten im ferromagnetischen Stoff. Welche Kraft überwiegt? Viele kleine oder eine große Kraft? Aber was geschieht mit seinen Nachbar-Elementarmagneten? Richten sie sich nach ihm aus? Oder müssen sie sich auch nach dem großen Magneten ausrichten?

Es klingt so einfach, alle Elementarmagnete richten sich nach dem großen Magneten aus. Aber um die Problematik im Detail zu verdeutlichen, die für Schüler nicht trivial ist, wird nun in der Abbildung 6.9 nur der eben beschriebene Elementarmagnet und seine beiden Nachbarn aus der oberen Ebene in Vogelperspektive betrachtet. Der schwarze Punkt im Zentrum deutet ihre Fixierung an.

Die Schüler müssen erklären können, ob sich der mittige Magnet um 180° dreht oder nicht.



Sie müssen erkennen, dass ohne genäherten großen Magneten auf den mittleren Magneten gleich große abstoßende Kräfte nach oben wie und nach unten wirken, so dass er sich nicht drehen kann. Zudem kann er sich auf Grund seiner mittigen Fixierung auch nicht nach oben oder unten bewegen. Bei genäherten Magneten aber dreht er sich um 180° , ebenso wie seine benachbarten Elementarmagnete.

An dieser Form der Erklärungen, über Analogien des Tauziehens und viele Hilfskonstruktionen, wird ersichtlich, dass dieses Modell II letztlich nicht auf einen eigenständigen, freien Gedankengang der Schüler hinauslaufen kann, sondern dass es – je nach Lehrerverhalten – mehr oder weniger „eingetrichtert“ wird.

Auf Grund der kognitiven Überforderung und den damit verbundenen Konsequenzen erhält dieses Modell II für das Kriterium „schülergerecht“ die Punktzahl -1. Da nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann, dass begabte Schüler das Modell adaptieren können, erhält es nicht die Minimalpunktzahl.

6.3.3 Analyse - zielgerecht

Dieses Modell II ist kaum zielgerecht, da sich die Schüler diese Anordnung des Modells II nicht eigenständig erschließen können. Letztlich können sie dieses Modell II auf Grund der fehlenden Vorkenntnisse (zur Raumbgitterstruktur und zu den Kräften) wie gerade im Kapitel 6.3.2 beschrieben, nur im Sinne des Nürnberger Trichters in sich aufnehmen. Daraus resultierend kann das Modell II keine Bedingungen im Unterricht schaffen, die ein produktives Denken nach Wertheimer (siehe Kapitel 5.5.3) fordern und fördern.

Auf Grund der zu großen Wissensdefizite zur eigenständigen Erfassung des Modells II kann man als Lehrer nicht dosiert Informationen geben, so dass der Schüler glücklich das „Heureka-Erlebnis“ der Einsicht und des Verstehens individuell in seinem eigenen Tempo erleben kann.

Das Modell II ist sehr lehrerzentriert, da man ständig dabei ist, Erklärungen und neuen Input zu geben und wiederholt Analogien aufzuzeigen, um überhaupt die Basis für ein echtes Verständnis auf Schülerseite zu sichern. Hinzu kommt die bereits aufgeworfene Frage zur Analyse „schülergerecht“, ob die vorhandenen kognitiven Strukturen des Schülers überhaupt diesen schwierigen Akkomodationsprozess zulassen. Da diese Frage nicht eindeutig und offensichtlich mit „Ja“ beantwortet werden konnte, lässt sich schlussfolgernd insgesamt festgehalten, dass dieses Modell II nicht die kognitiven Ziele der Förderung des eigenständigen, sinnstiftenden, produktiven Denkens erfüllen.

Die Prozessziele können mit diesem Modell II auch nicht verfolgt werden. Die physikalische Methode (siehe Kapitel 5.5.1) sowie die Vorgehensweise des Hypothesen Bildens und Überprüfens sowie Falsifizieren und Verifizieren können nicht erarbeitet und durchgeführt werden. Beim Modell II bleibt auch der experimentelle Zugang den Schülern verschlossen.

Je nach vorhandener kognitiver Struktur und rezeptiver Aufmerksamkeit seitens der Schüler kann das Modell II richtig nachvollzogen werden oder zur Aneignung von Trägem Wissen führen.

Auf Grund der lerntheoretischen Folgerung zu Trägem Wissen ist auf jeden Fall belegt, dass solch eine eintrichternde Methode eine mangelnde Effektivität und eine ungenügende Nachhaltigkeit zur Folge hat. Bestenfalls werden Konzeptziele vermittelt, die positiven, verstärkenden Gefühle, die beim eigenständigen Auffinden einer Lösung auftreten, fehlen jedoch leider vollständig. Zudem wird das Denken im Überblick und in großen Strukturen unterbunden. Somit erhält das Modell II im Kriterium „zielgerecht“ letztlich eine Punktzahl von -1.

6.3.4 Fazit

Die Variante II der drehbaren Fixierung ist fachgerecht, aber kaum schüler- und zielgerecht. Sie erhält daher im Kriterium „fachgerecht“ die Maximalpunktzahl von +2, und die Kriterien „schülergerecht“ und „zielgerecht“ erhalten jeweils nur die Punktzahl –1.

	fachgerecht	schülergerecht	zielgerecht	Summe
Dreh. Fixierung	+2	–1	–1	0

Abschließend ist dieses Modell weder sinnvoll, noch schädlich, vorausgesetzt, dass ein empathischer Umgang mit den Vorerfahrungen und mentalen Modellen der Schülern (Kraftbegriff und Raumgitterstruktur) und ein das selbständige und umfassende Denken und Experimentieren fördernder Unterricht stattfinden. Empfehlenswert ist diese Variante II jedoch nicht, da die Gefahr des Erwerbs von Trägem Wissen vorliegt. So muss man als Lehrer stets besonders bemühen sein, ein Denken in großen Strukturen zur Ausbildung semantischer Netzwerke zu fördern. Insgesamt erhält das Modell II die Gesamtpunktzahl 0.

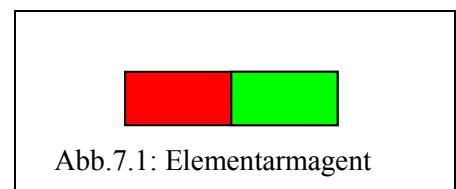
7. Kapitel

Entwicklung des alternativen Elementarmagneten-Modells

Auf Grund der dargestellten Grenzen der Modelle I und II wurde von der Autorin ein Modell entwickelt, welches im Folgenden als „alternatives Elementarmagneten-Modell“ bezeichnet wird. Dieses Modell wird nun zuerst vorgestellt und anschließend anhand der drei Kriterien „fach-, schüler- und zielgerecht“ auf seine Chancen und Grenzen hin überprüft.

7.1 Das alternative Elementarmagneten-Modell

Nach Abwägen verschiedener Alternativen wurde sich beim alternativen Elementarmagneten-Modell für den gleichen Grundbaustein entschieden, der auch in den Modellen I und II verwendet wird, den Elementarmagneten. Seine rechteckige Form²¹ ist in der Abbildung 7.1 dargestellt.



Alternativ wurde noch die Möglichkeit eines kugelförmigen Elementarmagneten in Betracht gezogen. Ein Vorzug dieses Grundbausteines wäre die Tatsache, dass man sich die Ausrichtung und die chaotische Positionierung von Kugeln, die auf Grund ihrer Form alle aneinander rollen, leichter vorstellen kann als von stabförmigen Magneten. Trotz dieses nicht ganz zu vernachlässigen Argumentes für die Kugelgestalt wurde sich letztlich für die, bisher in der Geschichte der Physik vertraute, Stabgestalt entschieden.

²¹ im 2 Dimensionen

Der entscheidende Vorzug für diese Form des Grundbausteines ist der, dass man bei einer Stabform direkt zwei Ende, zwei Seiten, zwei Pole, wahrnehmen kann, was auf Grund der hohen Symmetrie bei einer Kugel nicht der Fall wäre. Zudem ist für die Schüler die Stabgestalt sehr anschaulich, da der Elementarmagnet so in Form und Wirkungsweise dem eines Stabmagneten entspricht. Somit tritt für die Schüler ein (visueller) Wiedererkennungseffekt auf, da die typischen Magnetformen, die Schüler vorunterrichtlich kennen, Stab- und Hufeisenmagneten sind.

Die Stärke dieses Grundbausteins in Stabform liegt folglich darin, dass die Schüler bei ihrem Wissensstand, bei ihrer Lebensweltwirklichkeit, abgeholt werden, und sie so den Elementarmagneten (und schließlich auch seine Erklärung) in ihr kognitives Wissensnetz assimilieren können.

Die Erklärung des Ferromagnetismus über Spins, das Umklappen Weißscher Bezirke, das Ising-Modell und weitere komplexe Modelle zur Erklärung dieses begeisternden Phänomens (vgl. Kapitel 3.4) können Schülern in der Jahrgangsstufe 6 noch nicht verstehen. Eine damit einher gehende kognitive Überforderung würde Schüler eher demotivieren, als sie für die Physik und ihre Geheimnisse zu begeistern. Letzteres ist aber das Ziel.

Nachdem die Stabform der Elementarmagnete feststeht, hat eine weitere Orientierung an den Präkonzepten, mentalen Modellen und Vorerfahrungen der Schüler der Jahrgangsstufe 6 stattgefunden.

Hierbei wurde insbesondere überprüft, ob sich die Organisation der Lehrinhalte an der historischen Entwicklung des Magnetismus, im Sinne des „gnoseogenetischen Prinzips“ (siehe Kapitel 2), anbietet.

Wie im Kapitel 2.1 und 2.2 dargestellt, beginnt die historische Forschung zum Magnetismus mit Spekulationen, dass sich „eine Art Seele“ in den magnetischen Stoffen befindet, und mit Mythen, wie beispielsweise dem Magnetberg.

Dieses erste Stadium der *Spekulationen und Mythen zum Magnetismus* weist Parallelen zur Vorstellung von Kindern in der präoperativen Stufe nach Piaget (siehe Kapitel 5.4.2) auf. Ihr animistisches Denken fußt auch auf der Vorstellung, dass in Gegenständen eine Art Seele oder Bewusstsein vorhanden ist, wie das beschriebene Beispiel der Wolke (Kapitel 5.4.2) zeigt. Physikalische Phänomene werden in diesem Stadium mit bekannten Prinzipien aus anderen Erfahrungsbereichen beschrieben und die dort bekannten Wirkungsweisen auf das Beobachtete übertragen. (vgl. gnoseogenetische Prinzip der Psychologiedidaktik, [HEIN87]) Auch Banholzer (1936) und Barrow (1987) beobachteten bei jüngeren Kindern solche Vergleiche zum Thema Magnetismus. „Sie (die Kinder) sprechen z.B. von Klebstoff. Wenn sich nach intensivem Reiben herausstellt, dass der Klebstoff sich nicht entfernen lässt, ist dies noch kein zureichender Grund für die Anhänger dieser Theorie, ihre Vorstellung aufzugeben.“ [DUIT02]

Als nächstes schließt sich das Stadium der *Klassifikation zum Magnetismus* an. Der Magnet lässt sich nach Gilbert (siehe Kapitel 2.4) nun abgrenzend gegenüber anderen Stoffen als Gegenstand mit bestimmten Eigenschaften beschreiben. Er hat zwei Pole, den Nord- und den Südpol, und zwei Magnete wechselwirken auf bestimmte Weise miteinander, nämlich, dass gleichnamige Pole sich abstoßen und ungleichnamige sich anziehen. Eigene Untersuchungen zu den Vorkenntnissen der Schüler der Jahrgangsstufe 6 (siehe Kapitel 8.1: Erkläre einem Außerirdischen, was ein Magnet ist.) belegen, dass auch hier Parallelen zu dem beschriebenen historischen Erkenntnisstand zum Magnetismus vorliegen. Die Kinder sind auf Grund ihrer physikalischen Kenntnisse in der Lage, einen Magneten von anderen Stoffen zu unterscheiden, da er besondere, ihn auszeichnende, Eigenschaften aufweist.

Historisch folgt nun nach den Forschungen von Castelli (siehe Kapitel 2.4) das Stadium der *Spezifizierung zum Magnetismus*. Die Theorien und Experimente zum Magnetismus wurden spezifiziert und er entwickelte das Konzept der Elementarmagnete. Auch hierzu lassen sich Parallelen zum Erkenntnisstand der Schüler aufweisen. Wie in Kapitel 8.2 gezeigt wird, sind 95 % der Schüler in der Lage, sich einen massiven Körper wie einen Magneten als einen Gegenstand vorzustellen, der im Inneren eine Struktur aufweist. Diese Vorstellung soll im Physikunterricht der Jahrgangsstufe 6 weiter spezifiziert werden, und in der Elementarmagneten-Vorstellung münden.

Als letztes schließt sich das Stadium der *Generalisierung des Magnetismus* an. Ebenso wie sich, begonnen durch Ørsteds Entdeckung des Elektromagnetismus (siehe Kapitel 2.4), die Theorien zum Magnetismus generalisierten, so werden parallel auch die physikalischen Lerninhalte im Gymnasium der Jahrgangsstufe 6 zum Thema des Elektromagneten erweitert, wie ein Blick in das Curriculum (siehe Kapitel 4.1) verdeutlichte.

Somit lässt sich abschließen festhalten, dass es deutliche Parallelen zwischen den historischen Erkenntnisständen der Wissenschaft und den entwicklungspsychologischen Erkenntnisständen der Schüler zum Magnetismus gibt. Insofern bietet sich eine entsprechende Anordnung der Lerninhalte nach dem gnoseogenetischen Prinzip an.

Die in dieser Arbeit schwerpunktmäßig betrachteten Schüler der Jahrgangsstufe 6 haben jedoch das Stadium der *Spekulationen und Mythen zum Magnetismus* auf Grund der „wissenschaftlichen“ Vorkenntnis ihrer Eltern, Erzieher und Grundschullehrer, vielleicht in Kombination mit dem eigenen Umgang mit magnetischem Spielzeug, bereits abgeschlossen und befinden sich größtenteils im Stadium der *Klassifikation zum Magnetismus*.

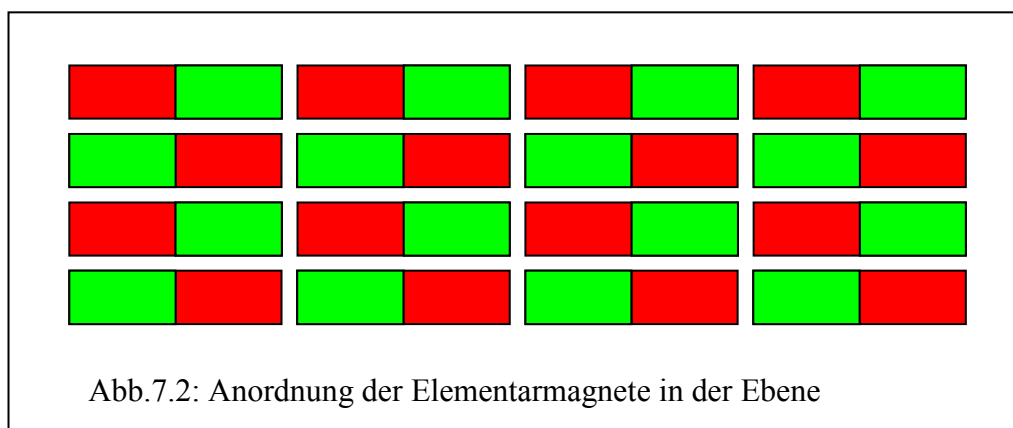
Wie bereits erwähnt, wurde hierfür eine eigene Analyse der „Mentalen Modelle zum Inneren eines Magneten“ (siehe Kapitel 8.2) in dieser Altersklasse vorgenommen. Diese ergab, dass ein überwiegender Prozentsatz (63%) der Schüler sogar die Vorstellung hat, dass sich im Inneren eines Magneten *viele Teilchen* befinden. Auf diese Vorstellung der Schüler aufbauend, wird nun ein Stoff betrachtet, in dem sich eine Menge von Teilchen, die oben dargestellten Elementarmagnete, befinden. Denn nur dadurch, dass diese Vorstellung bei Schülern überhaupt existiert bzw. kognitiv aufgebaut werden kann, ist ein solcher physikdidaktischer Ansatz sinnvoll.

Ausgehend vom Stadium der *Klassifikation zum Magnetismus*, das die Schüler in der Jahrgangsstufe 6 erreicht haben, kann man nun durch die Frage der Anordnung von Elementarmagneten in einem Stoff zum Stadium der *Spezifizierung zum Magnetismus* fortschreiten.

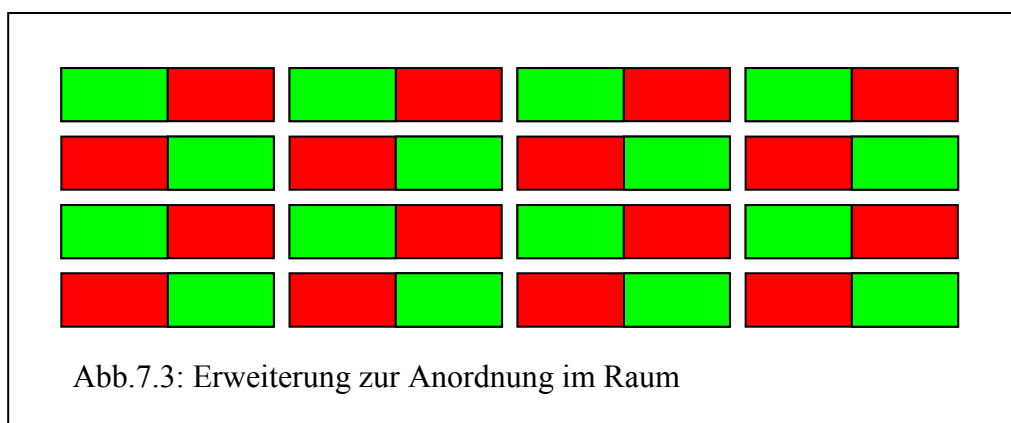
Jetzt greift die Problemlösekompetenz der Schüler, sie suchen den Problemraum nach entsprechenden Operatoren ab, und entdecken die Produktionsregeln (siehe Kapitel 5.3.1):

- „Wenn sich zwei gleichnamige Pole gegenüberstehen, dann stoßen sie sich ab.“
- „Wenn sich zwei ungleichnamige Pole gegenüberstehen, dann ziehen sie sich an.“

Aufbauend auf dieser physikalischen Grundlage lassen sich die Elementarmagnete positionieren. Es würde sich beispielsweise eine Parkettierung anbieten, bei der die Elementarmagneten wie in der Abbildung 7.2 angeordnet sind.



Und im Raum kann man diese Anordnung erweitern, indem man eine entsprechend komplementäre Anordnung, wie in Abbildung 7.3 dargestellt, auf die Abbildung 7.2 positioniert.



Bei solch einer Anordnung würde sich die magnetische Wirkung nach außen hin weitgehend kompensieren.

So stellt sich die Frage, wie die Elementarmagnete im Magneten, oder in einem magnetisierten ferromagnetischen Stoff angeordnet sein müssen?

- Die magnetische Wirkung darf sich dann nicht weitgehend kompensieren.
- Es müssen sich ganz eindeutig ein Nord- und ein Südpol ausbilden.
- Es müssen zugleich auch die Produktionsregeln erfüllt sein.

Nur mittels dieser Vorgaben, die die Schüler kennen bzw. sich selbständig erschließen können, da sie direkt an ihren Präkonzepten und Vorerfahrungen anschließen, gilt es nun, nicht passiv und rezeptiv in der Schulbank zu sitzen und den Lehrer das Problem lösen zu lassen, sondern sich eigenständig als Schüler Gedanken zu machen. Jetzt wird ganz bewusst das produktive Denken gefördert. Die Lösung des Problems ist das „alternative Elementarmagneten-Modell“.

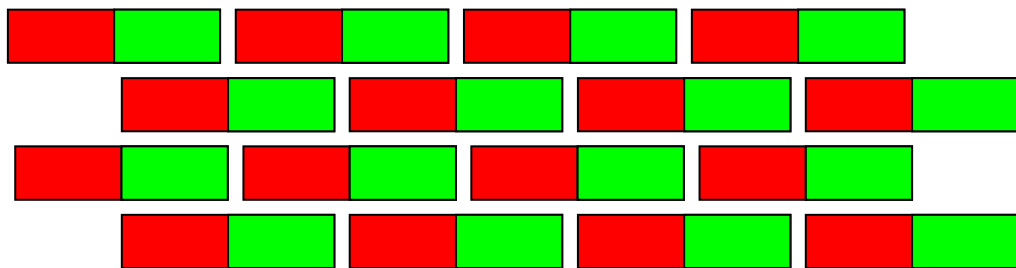


Abb.7.4: Das „alternative“ Elementarmagneten-Modell

Dieses alternative Modell lässt sich auch im Raum erweitern. Entsprechend komplementär würde die Anordnung (Abbildung 7.5) auf die Abbildung 7.4 positioniert.

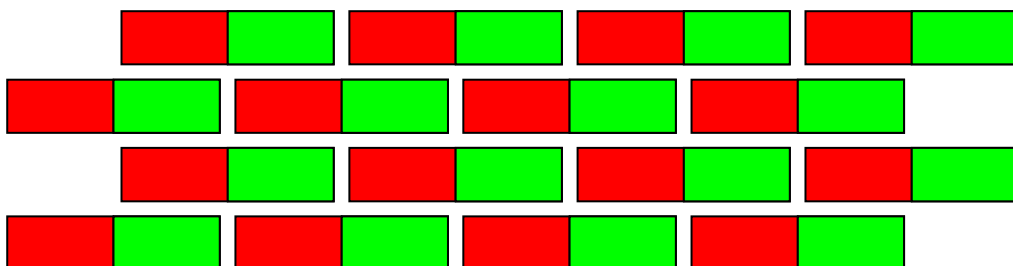


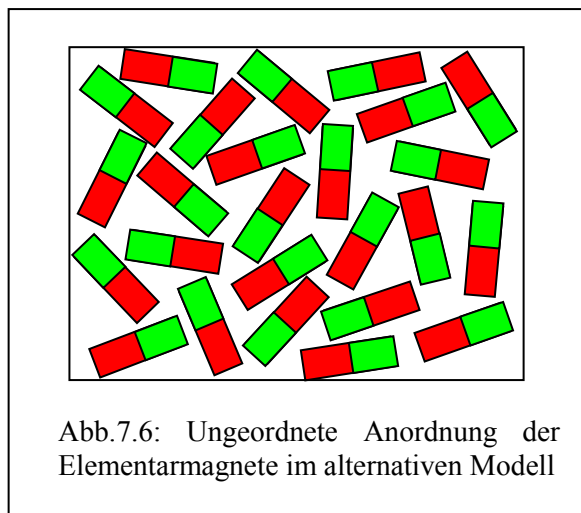
Abb.7.5: Erweiterung des alternativen Elementarmagneten-Modell im Raum

Mit diesem alternativen Elementarmagneten-Modell lassen sich ebenfalls die im Kapitel 4.2 dargestellten sechs physikdidaktischen Ziele erreichen, wie im Folgenden dargestellt wird.

1. Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe
2. Das charakteristische Verhalten beim Zerschneiden von Magneten
3. Die Magnetisierung aus der Distanz
4. Die Remanenz
5. Die Unmagnetisierbarkeit nicht-ferromagnetischer Stoffe
6. Die obere Grenze der Magnetisierbarkeit ferromagnetischer Stoffe

Zu 1. Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe

Im Inneren eines ferromagnetischen Stoffes, beispielsweise eines Stückes Eisens, befinden sich nach diesem alternativen Elementarmagneten-Modell ebenfalls viele Elementarmagnete. Diese sind zunächst relativ ungeordnet positioniert, wobei aber die Produktionsregeln beachtet werden (siehe Abbildung 7.6 und Anhang).

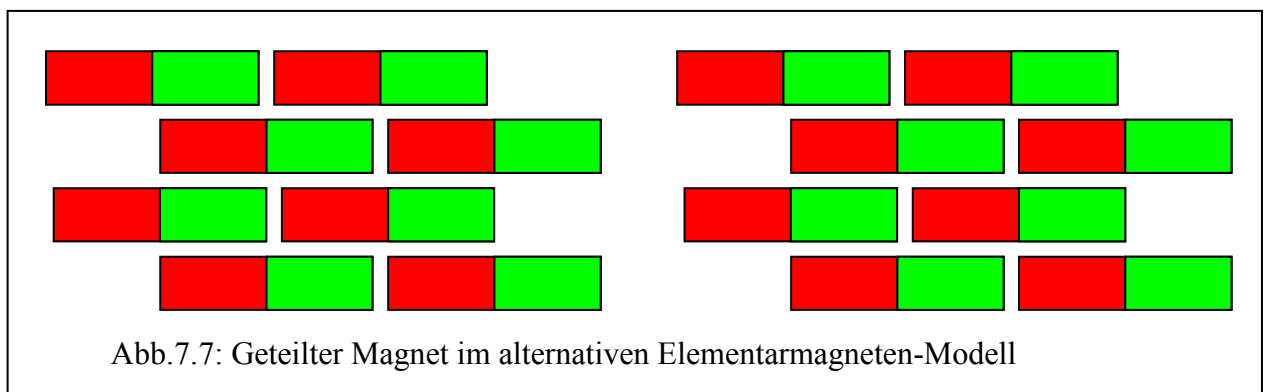


Wenn man jetzt das Stück Eisen in einer Richtung mit einem entsprechend starken Magneten überstreicht, zum Beispiel mit dem Nordpol, dann positionieren sich die Elementarmagnete wie in der Abbildung 7.4 mit 7.5. Dabei wechselwirken die Elementarmagnete im Eisen sowohl untereinander, als auch mit dem Magneten, mit dem sie überstrichen wurden. Es bildet sich an dem Streichrichtungsende des Eisens der Südpol aus, da sich alle Elementarmagnete mit ihrem Südpole nach außen richten. Am entgegengesetzten Ende bildet sich der Nordpol. Im mittleren Bereich des Eisenstücks schwächen sich die aufeinander folgenden Süd- und Nordpole in ihrer Wirkung nach außen ab.

Der ferromagnetische Stoff kann durch Erschütterung oder durch eine Temperaturerhöhung (über die Curietemperatur) entmagnetisiert werden. Dabei werden die Elementarmagnete aus ihrer angeordneten Struktur wieder in eine ungeordnete Position gebracht.

Zu 2. Das charakteristische Verhalten beim Zerschneiden von Magneten

Wenn ein Magnet oder ein magnetisierter Stoff geteilt wird, dann entstehen zwei kleinere Magnete. Jede Wiederholung dieses Teilungsvorganges erzeugt erneut weitere magnetische Dipole. Dieses Phänomen lässt sich auch mittels des alternativen Elementarmagneten-Modells problemlos erklären, da die Elementarmagnete im jeweils mittigen Bereich ihre Wirkungen nach außen kompensieren und sich so an den Enden die magnetischen Pole ausbilden. Abbildung 7.7 verdeutlicht dies.

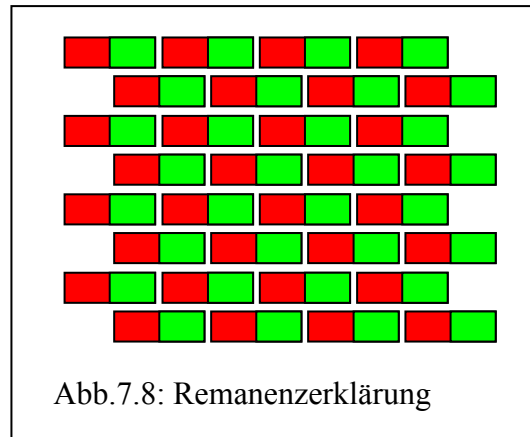


Zu 3. Die Magnetisierung aus der Distanz

Da die Erläuterung der Magnetisierung aus der Distanz auf die Erklärung unter „1. Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes“ zurückgreift, wie im Kapitel 4.2 ausführlich dargestellt wurde, lässt sich dieses Phänomen ebenso schlüssig mit dem alternativen Elementarmagneten-Modell erläutern.

Zu 4. Die Remanenz

Um das Phänomen der Remanenz zu erklären, also, dass die Wirkung der Magnetisierung noch andauert, obwohl man die Ursache entfernt hat, eignet sich dieses alternative Elementarmagneten-Modell besonders gut. Denn warum sollten sich die Elementarmagnete, die wie in Abbildung 7.8 angeordnet sind, direkt anders positionieren?



Wie störanfällig diese Anordnung ist, hängt dann davon ab, ob es sich um einen weich- oder hartmagnetischen Stoff handelt. Weichmagnetische Stoffe sind eher störanfällig als hartmagnetische und fallen daher eher in den Zustand der Abbildung 7.6 zurück.

Zu 5. Die Unmagnetisierbarkeit nicht-ferromagnetischer Stoffe

Die Beantwortung der Frage, warum manche Stoffe von einem Magneten angezogen werden können und andere nicht, ist quasi modellunabhängig. Bei Stoffen, die sich nicht magnetisieren lassen, liegen die Elementarmagnete regellos durcheinander und sind kaum bis gar nicht beweglich. Im alternativen Elementarmagneten-Modell ebenso, wie in der Abbildung 7.6 dargestellt, kompensieren sie sich in ihrer Wirkung nach außen hin und werden daher nicht von dem Magneten angezogen, und sind folglich unmagnetisch.

Zu 6. Die Grenze der Magnetisierbarkeit ferromagnetischer Stoffe

Das alternative Elementarmagneten-Modell erklärt auch, warum sich ein ferromagnetischer Körper nicht beliebig stark magnetisieren lässt. Wenn nämlich alle Elementarmagnete im ferromagnetischen Körper ausgerichtet sind, dann ist die magnetische Sättigung erreicht. Diese Erklärung ist also ebenso modellunabhängig.

7.2 Analyse des alternativen Elementarmagneten-Modells

Im Folgenden wird das alternative Elementarmagneten-Modell anhand der Kriterien der Elementarisierung auf seine Chancen und Grenzen hin überprüfen. Das Bewertungsschema hierfür entspricht aus Gründen der Vergleichbarkeit natürlich dem aus Kapitel 6.1.

7.2.1 Analyse – fachgerecht

Das alternative Elementarmagneten-Modell betrachtet, im Gegensatz zum klassischen Modell I, auch die Wechselwirkung der Elementarmagnete untereinander. Es baut somit auf den zuvor erworbenen Produktionsregeln („Wenn sich zwei ungleichnamige Pole gegenüberstehen, dann ziehen sie sich an.“ siehe Kapitel 6.2.1) lückenlos und logisch auf. Insofern ist das alternative Elementarmagneten-Modell fachgerecht, als dass es solide auf die klassischen physikalischen Grundlagen zurückgreift.

Zudem ist das alternative Elementarmagneten-Modell, ebenso wie das klassische Modell II auch, erweiterbar bezüglich seiner Raumstruktur sowie der näheren Spezifizierung des Elementarmagneten.

Der Elementarmagnet wird mit dem magnetischen Dipol eines Atoms identifiziert. Und das magnetische Moment des Atoms lässt sich, nachdem im Rahmen der Atomphysik der Aufbau eines Atoms aus Kern und Elektronen, später das Bohr'sche Atommodell, noch später eine kugelsymmetrische Aufenthaltswahrscheinlichkeit behandelt wird, dann als vektorielles Ergebnis der Addition der Kern-, Bahn- und Spinnmomenten betrachten. (siehe Kapitel 3).

Zudem ist das Besondere an dem alternativen Elementarmagneten-Modell, dass sich die Schüler die Raumgitterstruktur der Elementarmagnete selbständig erschließen können (siehe Kapitel 8.4.3) und sich somit selbständig die Erweiterbarkeit des Modells bezüglich der Raumgitterstruktur von Atomen erschließen können. Solch eine mögliche Positionierung der Atome in der Raumgitterstruktur fällt somit nebenbei beim Erschließen des alternativen Modells für die Schüler ab. Für den Lehrer bietet es die Möglichkeit, bei der Behandlung verschiedener Anordnungen von Atomen in einem Molekül auf die Anordnung der Elementarmagnete (magnetische Dipole der Atome) zurückzugreifen.

Somit ist das alternative Elementarmagneten-Modell auch sehr geeignet zur Erweiterung des Wissens und erhält insgesamt für das Kriterium „fachgerecht“ die maximale Punktzahl von +2.

7.2.2 Analyse – schülergerecht

Das alternative Elementarmagneten-Modell ist schülergerecht, da es die Schüler bei ihren Vorkenntnissen abholt, bei ihren Präkonzepten und vorunterrichtlichen Erfahrungen, die sie vielleicht im Umgang mit magnetischen Spielzeugen gemacht haben.

Aufbauend und anknüpfend an dieses Vorwissen, beispielsweise, dass sich ungleichnamige Pole anziehen und gleichnamige sich abstoßen, können sich die Schüler, wie bereits in Kapitel 7.2.1 erwähnt, eigenständig das alternative Elementarmagneten-Modell erschließen, ohne zusätzliche, weitere äußere Vorgaben zu erhalten. Die Grundidee des alternativen Elementarmagneten-Modells lässt sich nur mit Hilfe der Schülervorkenntnisse finden. Dass, und wie sie dies auch tatsächlich ohne fremde Impulse schaffen, ist in Kapitel 8.4 ausführlich dokumentiert.

So können sich die Schüler selber die Wirklichkeit erschließen, neue Phänomene assimilieren und somit gleichzeitig ihre kognitiven Strukturen und semantischen Netzwerke weiter ausbauen. Dieser kognitive Prozess ist nach Studien der Kognitionstheorie für den Lernprozess sehr förderlich und stellt somit einen weiteren Vorzug des alternativen Elementarmagneten-Modells dar. (vgl. Kapitel 5.4.4)

Eine weitere Stärke dieses Modells ist ihre experimentelle Überprüfbarkeit in der Praxis. Die möglichen Schüler-Hypothesen können leicht von Schülern selbständig mit Stabmagneten nachgebaut werden (siehe Kapitel 8.4). Dieses Nachbauen mit den Stabmagneten fördert zudem auch die experimentellen, praktischen Fähigkeiten der Schüler. Darüber hinaus bereitet es sichtlich Freude, was bereits bei den Vortest aber auch in der Unterrichtseinheit selber beobachtet werden konnte. Nicht zuletzt zeigt auch die Auswertung der Evaluation (siehe Kapitel 9.2) die große positive Wirkung des Experimentierens auf die Schüler.

So können die Schüler im wahrsten Sinne des Wortes die neuen Sachverhalte „begreifen“. Es ist bekannt (siehe Kapitel 5.4.4), je multipler Wissen repräsentiert wird, desto leichter fällt die Enkodierung.

Gerade dadurch, dass dieses alternative Modell von den Schülern selbständig in der Praxis entwickelt und sowohl mit Papier- als auch mit echten Magneten in Gruppen nachgebaut werden kann (siehe Kapitel 8), entwickelt sich ein semantisches Netz aus den verschiedenen Eindrücken und Informationen zum Magneten. Wird nun später einer dieser Eindrücke aktiviert, aktivieren sich auf Grund der Netzstruktur die gesamten im Netz befindlichen Informationen zum Magneten. Das alternative Elementarmagneten-Modell fördert somit geradezu den Aufbau semantischer Strukturen.

Dadurch wird Träges Wissen erst gar nicht angebaut, sondern direkt vom Lerner aktiv eine Wissensstruktur mit entsprechenden Repräsentanten ausgebaut.

Auf Grund dieser ausschließlich positiven Wirkungen des alternativen Elementarmagneten-Modells erhält es für die Kategorie „schülergerecht“ die maximale Punktzahl von +2.

7.2.3 Analyse – zielgerecht

Das alternative Elementarmagneten-Modell ist zudem auch zielgerecht. Es fördert im vollen Umfang das einsichtige, das lebendige, das produktive Denken des Schülers. Durch die lückenlose Logik des neuen Modells und seine systematische Vernetzung und Anknüpfbarkeit an die Vorerfahrungen und Vorkenntnissen, wird es dem Lernenden ermöglicht, „in unmittelbarer lebendiger Auseinandersetzung mit der Sache eigene Einsicht zu gewinnen und sich von ihr leiten zu lassen.“ Und nur wo dies der Fall ist, so Wertheimer, „kann von geistiger Selbständigkeit die Rede sein.“ [WERT64] Und genau das eigene (aktive!) Ausführen solcher Denkprozesse, das kritische und eigenständige Hinterfragen, wird mittels dieser Methode geradezu herausgefordert. Das rezeptive, blinde Repetieren wird gestoppt.

Die Erprobung des alternativen Modells in der Praxis des Schulalltages (siehe Kapitel 8.4.3) dokumentierte diesen wundervollen und für die Schüler selber so Freude bereitenden Prozess der eigenen Erkenntnisgewinnung, wie beispielsweise der Ausruf; „Ich hab’s!“.

Dieses Modell fördert das eigenständige Lernen in vollem Maße. Alte Wissensblöcke werden neu aktiviert, mit neuen erweitert und anderen verknüpft, semantische Netzwerke so ausgebaut und ggf. umstrukturiert, dass letztlich beim ausführenden Denker eine Verfeinerung seiner Strukturen erfolgt. Träges Wissen wird, wie bereits in Kapitel 7.2.2 erwähnt, im Keim erstickt.

Die Schüler werden im Gegensatz zum klassischen Modell I nicht zum „blinden Nicker“, und im Gegensatz zum klassischen Modell II nicht zum „Nachvollzieher“, sondern selber zum produktiven Denker. Somit werden mit diesem alternativen Elementarmagneten-Modell die Ziele zur Ausbildung eines mündigen Bürgers verfolgt. Aber neben diesen sozialen Zielen werden auch die Konzept- und Prozessziele stark gefördert. Das sehr gute Ergebnis des Lernerfolg-Kontrollbogens (siehe Kapitel 9.1) bestätigt die positive Selbsteinschätzung der Schüler bezüglich des guten Kenntnisstandes zu dem Thema Magnetismus. Die Lehrerin konnte diesen sehr guten Vollzug des Lernprozess auch im Unterrichtsgeschehen beobachten.

Auch die physikalische Methode (siehe Abbildung 5.16, Kapitel 5.5.1) konnten im Kleinen nachvollzogen werden. Der Regelkreis der Erkenntnis (Abbildung 5.17, Kapitel 5.5.1), diese typische Methode der Physiker, das Aufstellen von Hypothesen und deren Verifizierung mittels gezielter Experimente in der Praxis, können die Schüler so selber als kleine Forscher nachempfinden. Besonders das vorherige Nachdenken und Abschätzen möglicher Folgen und Konsequenzen im Vorhinein, wie die Schüler es mit den Papier-Elementarmagneten (siehe Kapitel 8.4) durchgeführt haben, ist für das Leben der Schüler - weit über den Physikunterricht hinaus - eine wichtige Kompetenz, die man nicht zu früh anfangen kann zu erlernen. Somit erfüllt das alternative Elementarmagneten-Modell die Prozessziele des Physikunterrichtes in vollem Maße.

Da insgesamt das alternative Elementarmagneten-Modell im besonderen Maße die Ziele des Physikunterrichtes, des Unterrichtes allgemein, und insbesondere im höchsten Maße das physikdidaktisch sehr wertvolle produktive Denken mit seinen positiven emotionalen Effekten fördert, erhält dieses Modell in dem Kriterium „zielgerecht“ die maximale Punktzahl von +2.

7.2.4 Fazit

Das alternative Elementarmagneten-Modell ist fachgerecht, schüler- und zielgerecht. Es erhält daher in allen drei Kriterien jeweils die maximale Punktzahl von +2.

	fachgerecht	schülergerecht	zielgerecht	Summe
Alternatives M.	+2	+2	+2	+6

Abschließend ist dieses Modell somit sehr sinnvoll. Es legt seinen Fokus auf die strukturelle Logik, die lückenlose Vernetzung mit den Vorkenntnissen sowie den Aus- und Umbau kognitiver Wissensstrukturen. Besonders die Tatsache, dass sich dieses Modell leicht von Schülern eigenständig experimentell überprüfen lässt, fördert zum einen den Einblick in das wissenschaftliche Vorgehen der Forscher, als auch zum anderen einfach die praktischen Experimentierfähigkeiten der Schüler sowie auf jeden Fall ihre Motivation, was auch die Evaluation der Schüler eindeutig ergab (siehe dazu Kapitel 9.2). Somit erhält das alternative Elementarmagneten-Modell insgesamt die maximale Punktzahl von +6.

8. Kapitel

Erprobung des alternativen Elementarmagneten-Modells in der Praxis

Um zu untersuchen, ob das gute theoretische Abschneiden des alternativen Elementarmagneten-Modells sich auch in der Praxis, im Schüleralltag, bestätigt, wurde es in zwei Klassen der Jahrgangsstufe 6 an Gymnasien in Nordrhein-Westfalen erprobt.

Hierbei war es absolut notwendig, ein unverfälschtes Bild des Vorwissens und der Vorstellungen der Schüler zu erhalten. Auch im Verlauf der Unterrichtsreihe durften die Schüler bei der Entwicklung ihrer mentalen Modelle nicht durch Vorgaben oder Äußerungen der Lehrerin beeinflusst werden.

Um in den Erarbeitungs- und Entdeckungsphasen wirklich unvoreingenommene und freie Schülervorstellungen zu erhalten, ist es wichtig, dass die Schüler in einer bewertungsfreien Atmosphäre, ihren Gedanken, Ideen und kreativen Vorstellungen freien Lauf lassen können. Dies wurde zusätzlich dadurch unterstützt, dass die Schülerergebnisse anonym²² erfasst wurden.

Die zentrale Voraussetzung zur Beurteilung, ob ein Modell fach-, schüler und zielgerecht ist, ist nämlich eine unbeeinflusste Datenerfassung, da das alternative Modell zum einen an dem Vorwissen der Schüler anknüpfen, und zum andern dem intuitiven Erkenntnisprozess der Schüler folgen will.

²² Einige Schüler haben aus freien Stücken ihre Namen auf die Arbeitsblätter geschrieben.

Um dieses Ziel von Beginn an umzusetzen, wurde das neue Thema „Magnetismus“ nicht angekündigt, sondern als Überraschung gestaltet. Zum Einstieg in die neue Unterrichtsreihe sollten die Schüler in absoluter Stille verweilen, bis jeder von ihnen einen Gegenstand (Abb.8.1) erhalten hatte. Aus eigenem Antrieb begannen sie direkt, mit dem Gegenstand zu experimentieren und fanden dabei schnell heraus, dass es sich bei ihm um einen Magneten handelt. Ohne Vorgabe erkannten sie somit, anknüpfend an ihr Vorwissen, ihr neues Unterrichtsthema „Magnetismus“.



Abb.8.1: Stabmagnet

Die Schüler erhielten nun den Arbeitsauftrag, sich alleine oder in kleinen Gruppen Experimente mit dem Magneten zu überlegen und diese durchzuführen. Dabei waren die Schüler sehr kreativ und hatten innerhalb kürzester Zeit viele interessante Experimente durchgeführt. Anschließend wurden alle Experimente im Plenum vorgeführt.

Ziel dieser freien Experimentierphase war es, dass sich die Schüler spielerisch und mit großer Motivation mit den Magneten auseinandersetzen können und sich erste Fragen stellen bzw. Gedanken machen und sich so Präkonzepte zum Magneten bei ihnen ausbilden.

8.1 Vorwissen zum Magneten

Um gezielt und individuell das Vorwissen der Schüler zum Magneten zu erfassen, erhielten sie anschließend den Arbeitsauftrag, aufzuschreiben, wie sie einem Außerirdischen erklären würden, was ein Magnet sei.

Bei der Analyse der Schülerantworten fiel auf, dass sie im Grunde übereinstimmten, sie enthielten nämlich eine oder mehrere der folgenden Kernaussagen:

1. Ein Magnet besitzt zwei Pole.

Dabei haben teilweise die Schüler diese Pole noch näher bezeichnet, manche als Minus- und Plus-Pol, einige wenige als Nord- und Südpol.

2. Ein Magnet ist ein Gegenstand, der andere Gegenstände anzieht.

Einige haben noch erwähnt, dass er andere Magnete auch abstoßen kann.

3. Ein Magnet besteht aus Metall.

Manche gaben auch spezieller an, er bestehe aus Eisen.

Die Konsequenz aus den ähnlichen Schülerantworten ist, dass die Vorkenntnisse aller Schüler der Jahrgangsstufe 6 zum Magneten relativ einheitlich sind. (vgl. Stadium der Klassifikation zum Magnetismus, Kapitel 7.1)

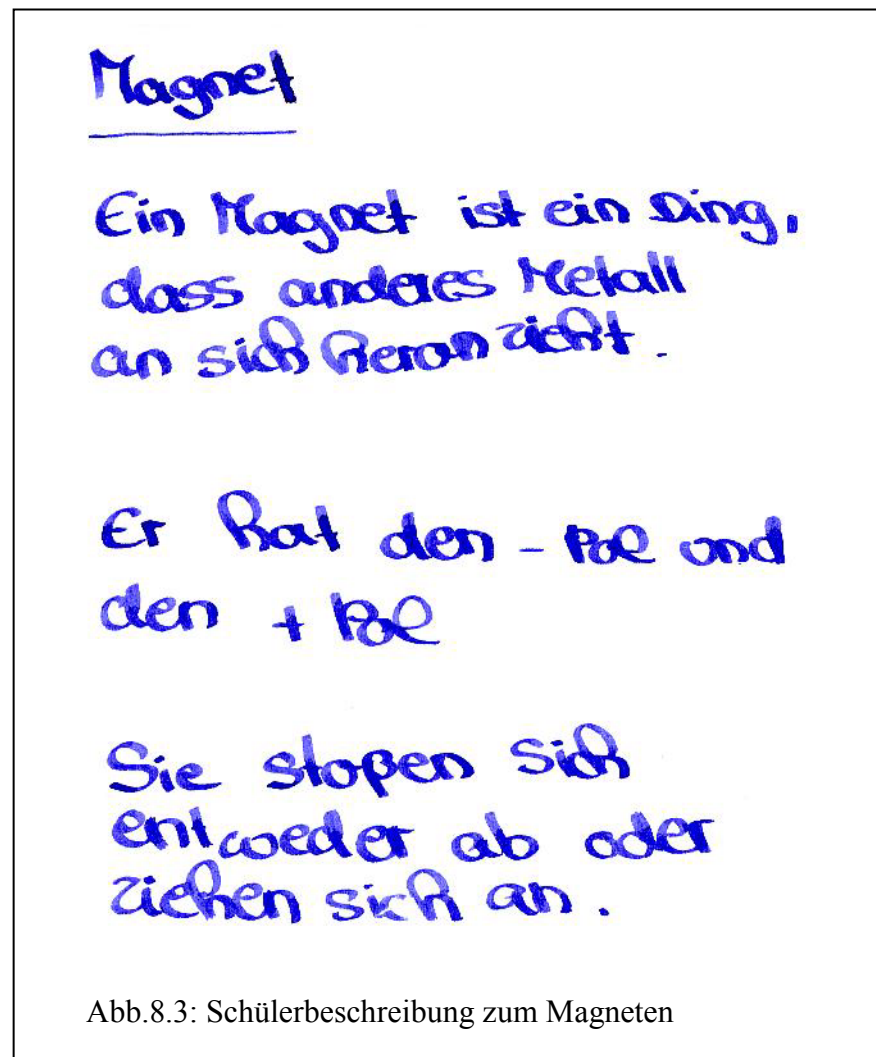
Ihre Vorstellungen, die prinzipiell in eine physikalisch richtige Richtung zielen, wurden bewusst unkommentiert gelassen, um die Schüler in ihren weiteren Erkenntnisprozessen nicht zu beeinflussen oder gar zu manipulieren.

Zwei Antworten werden hier exemplarisch vorgestellt.

Lieber Herr Außerirdischer!

Ein Magnet ist ein metallischer Gegenstand der andere Metalle anzieht. Durch seine Anziehungskraft zieht er alle metallische Gegenstände an. Jeder Magnet hat eine Plus (+) und Minus (-) Seite. Wenn ein metallischer Gegenstand mit der Minus (-) -Seite an die Plus (+) Seite annähernd Feld zusammen kommt, platsch! schon hängen sie zusammen.

Abb.8.2: Schülererklärung zum Magneten



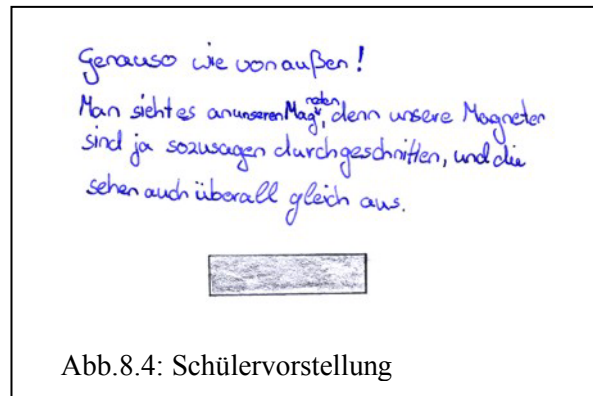
8.2 Mentale Modelle der Schüler zum Inneren eines Magneten

An dieses gemeinsame Vorwissen der Schüler anknüpfend, ohne jegliche weitere Vorgaben, erhielten sie die Aufgabe, aufzuzeichnen, wie sie sich einen Magneten von Innen vorstellen.

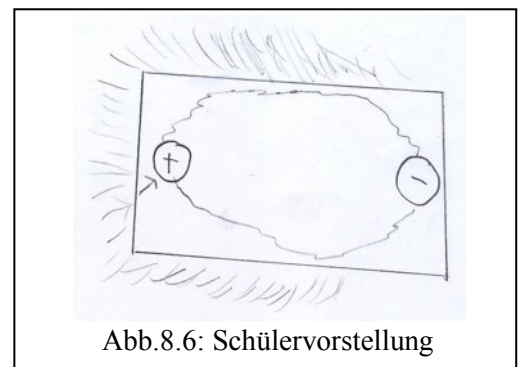
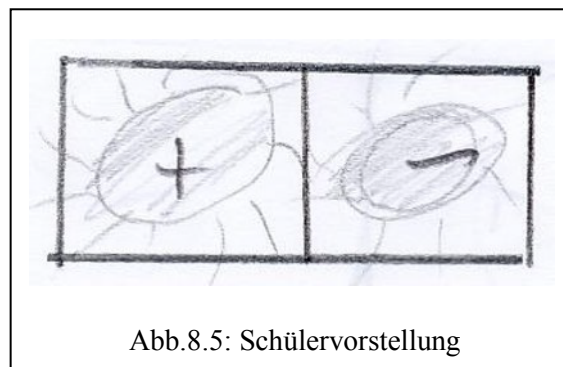
Ziel dieser Aufgabe war es, zu überprüfen, ob die Schüler in der Lage sind, sich einen massiven Körper, wie den Magneten, aus kleineren Teilchen zusammengesetzt vorzustellen, oder ob sie andere oder gar keine Vorstellungen vom Inneren eines Magneten haben bzw. bilden können.

Die Ergebnisse der Schülerzeichnungen lassen sich grob in vier Kategorien klassifizieren:

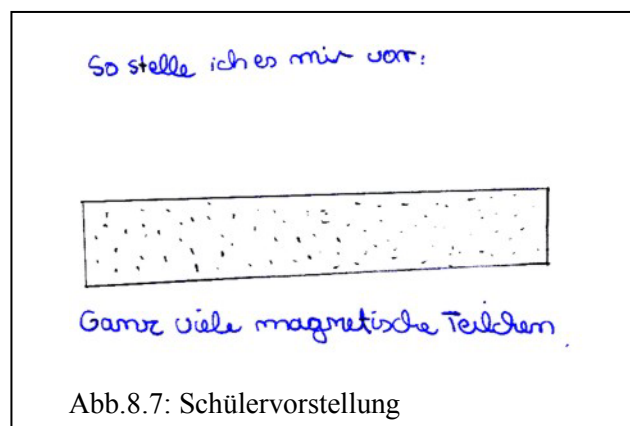
1. Ein Magnet sieht innen und außen gleichermaßen aus. Deshalb ist der Magnet ganz ausgemalt worden. Exemplarisch für diese Vorstellung, die bei 5% der Schüler vorhanden war, steht folgende Schülerzeichnung.



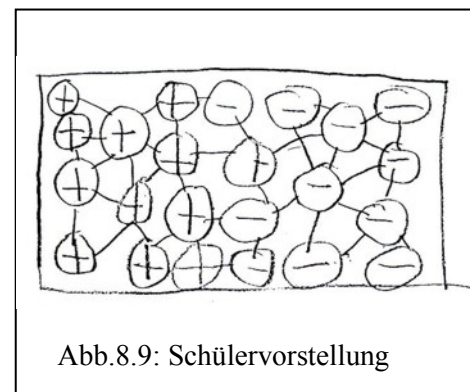
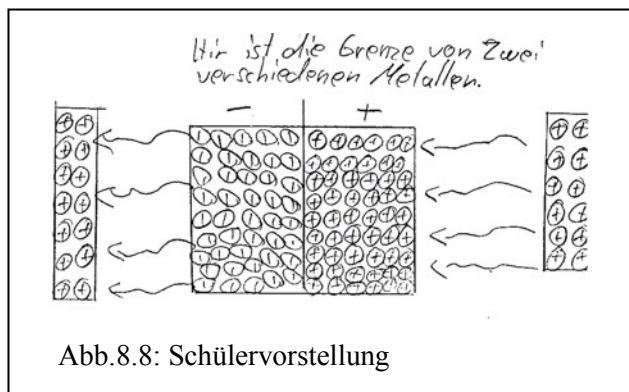
2. Ein Magnet besitzt im Inneren an seinen Polen je ein Teilchen, diese wurden häufig mit einem Plus- und einem Minus-Zeichen gekennzeichnet. (19%)



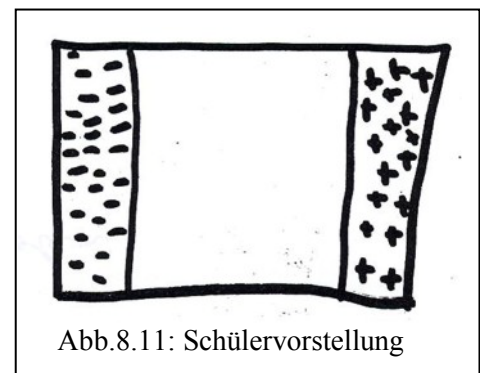
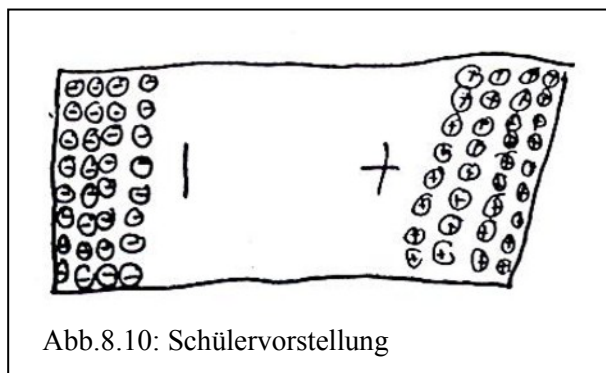
3. Ein Magnet besteht aus vielen kleinen Teilchen (63%), wobei hier folgende verschiedene Vorstellungen zu unterscheiden sind:
 - a) Der gesamte Magnet besteht ohne jegliche Unterteilung aus einer Teilchensorte.



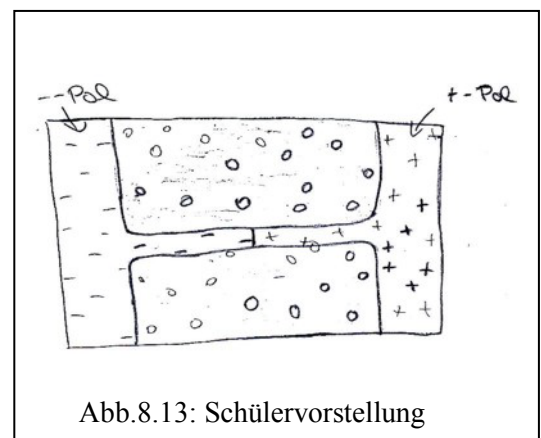
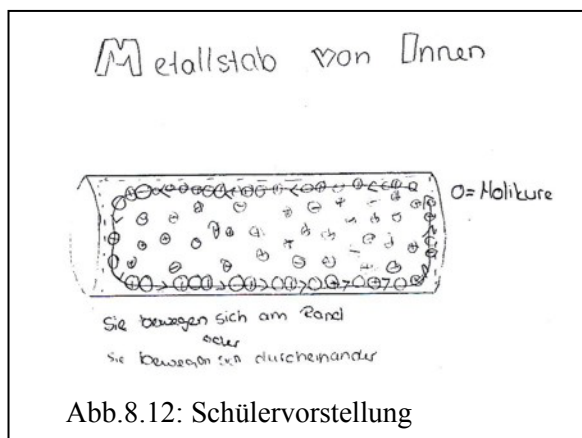
- b) Der Magnet ist zweigeteilt und besteht aus zwei Teilchensorten, die häufig mit einem Plus- und einem Minus-Zeichen gekennzeichnet wurden.



- c) Der Magnet ist dreigeteilt, und nur die beiden Pole des Magneten haben die Zwei-Teilchen-Struktur, das Mittelstück des Magneten bleibt davon unberührt.



- d) Der Magnet besteht aus zwei verschiedenen Teilchensorten, die im Inneren des Magneten sehr unterschiedliche Wege zurücklegen können.



- e) Der Magnet ist aus Dipol-Teilchen bzw. zwei Teilchensorten aufgebaut, die in einer bestimmten Weise im Magneten angeordnet sind.

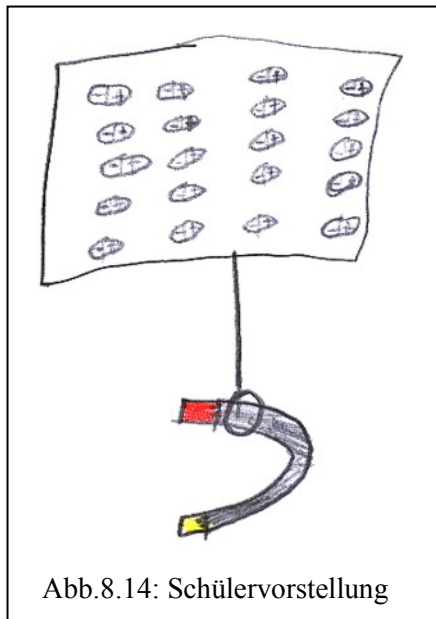


Abb.8.14: Schülervorstellung

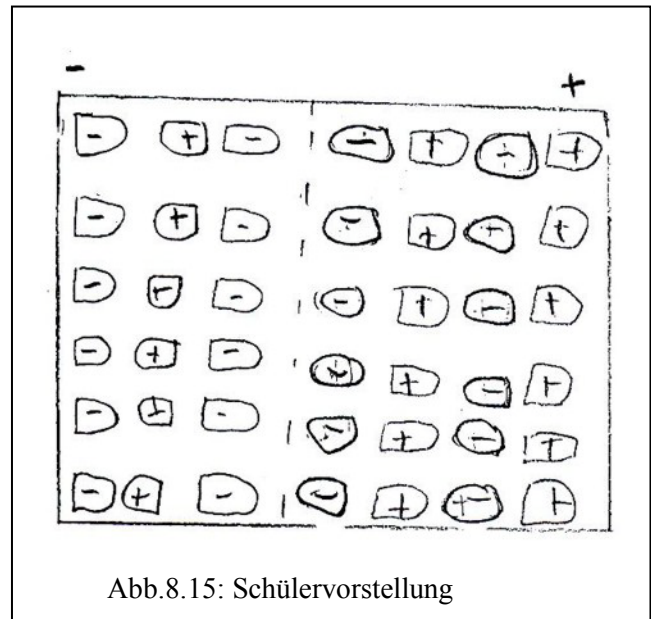


Abb.8.15: Schülervorstellung

4. Der Magnet enthält weder ausschließlich Teilchen, und auch nicht die einfache Zweiteilung, sondern beruht auf Kombinationen der vorherigen Varianten oder direkt auf anderen Vorstellungen, die sich weder untereinander noch sinnvoll in die drei aufgezeigten Kategorien einordnen lassen. (13%)

Die vier Kategorien und ihre relativen Häufigkeiten werden zwecks besserer Übersichtlichkeit in folgender Tabelle noch mal zusammengestellt.

Kategorien zur Vorstellung des Inneren eines Magneten	Relative Häufigkeit
1. „keine innere Struktur“ (innen wie außen)	5 % [3 von 62]
2. „innere Zwei-Teilchen Struktur“	19 % [12 von 62]
3. „innere Viel-Teilchen Struktur“	63 % [39 von 62]
4. „andere innere Strukturen“	13 % [8 von 62]

Die vielseitigen und verschiedenen Schülervorstellungen zeigen deutlich, dass die Schüler in dieser Jahrgangsstufe 6 zu 95 % in der Lage sind, sich durch ihr Vorwissen oder ihre Vorerfahrungen, den massiven Magneten als einen Gegenstand vorzustellen, der im Inneren eine Struktur aufweist.

Und mehr als die Hälfte, 63 % der Schüler, verfügen bereits zu diesem frühen Stadium über die Vorstellung, dass sich im Inneren eines Stoffes viele kleine Teilchen befinden.²³

Dies ist ein sehr wichtiges Analyseergebnis auf dem Weg zur Erprobung des alternativen Elementarmagneten-Modell, denn nur wenn die Schüler kognitiv überhaupt die Möglichkeit haben, ein Teilchenmodell zu erfassen, kann es sinnvoll sein, die Schüler selbständig ein Modell mit Elementarmagneten entwickeln zu lassen.

8.3 Einführung des Elementarmagneten

Da die Schüler bisher ihre Überlegungen in ihrer eigenen Sprache formuliert haben, was in der Erarbeitungsphase auch sehr wichtig ist, wurden nun mit ihnen in der Sicherungsphase die physikalische Fachbegriffe „Nordpol“ und „Südpol“ erarbeitet.

Dabei wurde zum einen an dem Vorwissen der Schüler zur Existenz zweier magnetischer Pole (Kapitel 8.1), und zum anderen an ihren Alltagserfahrungen zum Umgang mit dem Kompass und dem geographischen Nord- bzw. Südpol angeknüpft.

Aus der Tatsache begründet, dass die Erde selbst ein Magnet ist²⁴, und der Experimentier-Erfahrung, dass zwei ungleichnamige Pole sich anziehen, erhielten die Schüler die Aufgabe, ihren Magneten mit den korrekten Polbezeichnungen zu markieren. Dazu haben sie den Magneten mittig an einem Faden befestigt und ihn im Erdmagnetfeld ausrichten lassen. Der Magnetpol, der zum magnetischen Nordpol zeigte, wurde entsprechend mit Südpol beschriftet. Exemplarisch ist ein solcher markierter Magnet in der Abbildung 8.16 dargestellt.



Abb.8.16:Markierter Stabmagnet

²³ Nur 5 % der Schüler verfügen nicht direkt über eine Vorstellung einer inneren Struktur. Diese Vorstellung korrespondiert mit dem „pulling magnet“ Modell von Erickson und dem „Magnetism as pulling“ Modell von Borges und Gilbert (siehe Kapitel 5.4.1).

²⁴ Aus dem Erdkundeunterricht war bekannt, dass sich der magnetische Nordpol in der Nähe des geographischen Südpol befindet und umgekehrt.

Des Weiteren wurde der Begriff des „Elementarmagneten“ eingeführt. Dies geschah anfangs in einem realen Experiment, das letztlich in einem Gedankenexperiment mündete. Zwei Schüler haben einen Stabmagneten - gut sichtbar für die Mitschüler - mehrfach an einer präparierten Stelle geteilt, und erstaunlicherweise erstanden dadurch immer wieder neue Magnete. Davon haben sich alle Schüler dann auch selber praktisch überzeugt.

Durch eine Frage zur immer weiteren Teilung motiviert, gelangten die Schüler letztlich zur Vorstellung des „Elementarmagneten“ als kleinsten, unteilbaren Stabmagneten.

Die Schüler waren hierbei fasziniert und überrascht von der Vorstellung, dass die Wissenschaftler (noch?) keinen magnetisches Monopol gefunden bzw. erzeugt haben. Diese Information wurde ihnen gegeben, denn experimentell können sie dies leider nicht in der Schule nachentdecken.

8.4 Schülervorstellungen zur Anordnung von Elementarmagneten

Damit die Vorstellung der Elementarmagnete für die Schüler nicht abstrakt bleibt, sondern Leben gewinnt, wurde eine DIN A4 Bastelvorlage (siehe Abbildung 8.17) entworfen.

Die Schüler haben die Elementarmagnete in den entsprechenden Farben - rot und grün - angemalt und ausgeschnitten (zwei Spalten pro Schüler). Dass es sich dabei nur um ein Modell handelt, war den Schülern offensichtlich klar, da Papier nicht die Eigenschaften eines Magneten besitzt. Somit wurde der Schwierigkeit im Umgang mit Modellen, dass Schüler sie mit der Wirklichkeit gleichsetzen (siehe Kapitel 5.1, [BORN83]), rein praktisch entgegengewirkt.

N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S

Abb.8.17: Bastelvorlage

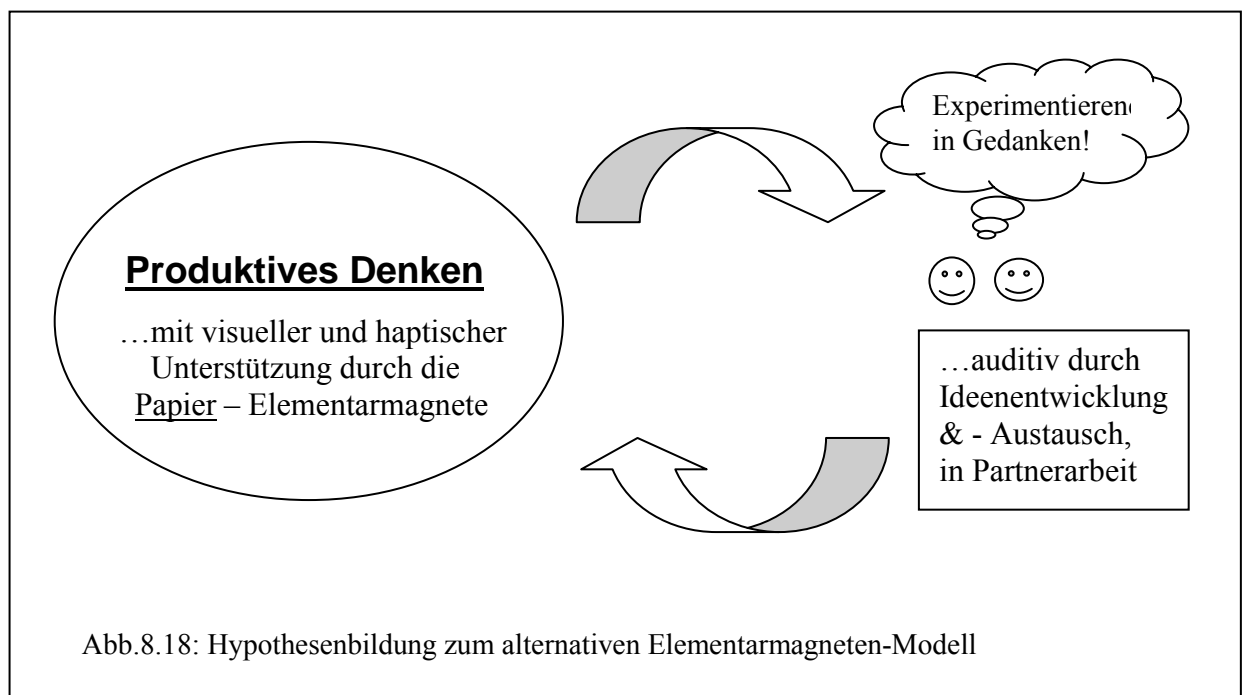
Zudem haben die Papier-Elementarmagnete noch zwei Vorteile. Zum einen helfen sie über die Tatsache hinweg, dass die Schule natürlich nicht für jeden Schüler mehrere Magnete zur Verfügung stellen kann, und zum anderen ermöglichen sie den Schülern einen

„denkenden Zugang“, denn die Papiermagnete lassen sich beliebig anordnen, echte Magnete hingegen würden jedes Nachdenken im Vorhinein verhindern.

Mit den bunten Elementarmagneten ausgestattet, erhielten die Schüler nun nacheinander vier Aufgaben zur Anordnung der Elementarmagnete, die in den folgenden Kapiteln dargestellt sind.

- Anordnung in der Ebene (Kapitel 8.4.1)
- Anordnung im Raum (Kapitel 8.4.2)
- Anordnung zu einem Magneten in der Ebene (Kapitel 8.4.3)
- Anordnung zu einem Magneten im Raum (Kapitel 8.4.4)

Diese vier Aufgaben sind jeweils prinzipiell so aufgebaut, dass die Schüler in Partnerarbeit zuerst eine Hypothese bilden. Dabei wird produktives Denken (siehe Kapitel 5.5.3) gefördert und gefordert. Beispielsweise wie in Abbildung 8.18 dargestellt, oder auch individuell anders, können sie Schüler ihre Ideen und Hypothesen entwickeln.



Daraufhin werden die Hypothesen im Plenum vorgetragen und diskutiert. Anschließend werden Experimente überlegt, um die aufgestellten Hypothesen in der Praxis zu überprüfen. Und letztlich werden diese ausgeführt und so entweder die Hypothesen falsifiziert oder verifizieren.

Ein besonderer didaktischer Schwerpunkt dieser Methode liegt darin, dass die Schüler zum produktiven Denken, eigenständigen kritischen Hinterfragen und zum reflektierten Überprüfen ihrer Überlegungen und der des Partners angeregt werden.

8.4.1 Anordnung in der Ebene

Die Aufgabe 1 lautet, dass die Schüler ihre „Papier-Elementarmagnete“ so nebeneinander in der Fläche anordnen sollen, wie echte Magnete von alleine halten würden. Diese Aufgabe sollten sie in Partnerarbeit lösen, um ihre Überlegungen auszutauschen, sich argumentativ auf eine gemeinsame Lösung zu einigen, und letztlich ihre Lösung auf dem Arbeitsblatt aufzukleben.

Anschließend durften die einzelnen Teams ihre Überlegungen den Mitschülern vorstellen. Dies gestaltete sich recht zügig und einstimmig, da alle Gruppen prinzipiell dieselbe Lösungsstrategie gewählt hatten.

Basierend auf den Produktionsregeln zum Magnetismus, dass gleichnamige Pole sich abstoßen und ungleichnamige sich anziehen, entwickelten sie ihre Lösungen. Dadurch festigen sich bei den Schülern diese Produktionsregeln. Abbildung 8.19 zeigt exemplarisch eine Schülerlösung.



Daraufhin sollten sich die Schüler Gedanken machen, wie sie die Richtigkeit ihrer Überlegungen überprüfen können. Dazu schlugen sie vor, ihre Anordnungsideen mit ihren echten Stabmagneten nachzubauen. Sie vereinten sich nun eigenständig zu größeren Gruppen (dies ist ihnen aus dem Unterricht vertraut) und experimentierten. Ein Ergebnis ist in Abbildung 8.20 zu sehen.



Abb.8.20: Experimentelle Überprüfung der Aufgabe 1

Das Nachbauen in Gruppen führte zu einer Bestätigung der Schülerideen. Die Schüler haben somit selbständig die Richtigkeit ihrer Idee experimentell bewiesen.

Komplizierter im Nachbau, aber prinzipiell nicht falsch, war der Aufbau von einer Lösungs idee, die zwei Partnergruppen sich überlegt hatten. Sie hatten die Elementarmagnete sowohl waagrecht, als auch senkrecht positioniert (siehe exemplarisch Abbildung 8.21). So entstanden beim experimentellen Überprüfen mit den Magneten teilweise unregelmäßige Anordnungen. Daraufhin schlug ein Schüler der Gruppe vor, im Folgenden alle Magnete entweder waagrecht oder senkrecht anzuordnen.

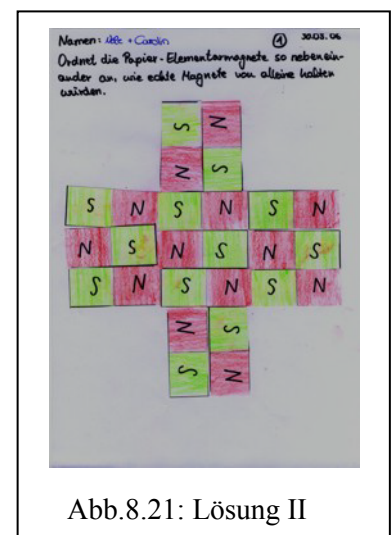


Abb.8.21: Lösung II

8.4.2 Anordnung im Raum

In der Aufgabe 2 sollten die Schüler die Elementarmagnete nun nicht mehr nur in der Ebene, sondern im Raum anordnen. Dazu legten sie in Partnerarbeit die Papier - Elementarmagnete in mehreren Ebenen übereinander. Einige clevere Gruppen haben die Papier-Elementarmagnete einfach auf die schon aufgeklebte Magnet - Ebene von Aufgabe 1 gelegt. Dabei galt jetzt für alle Gruppen die Regel, die Papier-Elementarmagnete entweder immer längs oder immer quer anzuordnen.

Aufeinander geklebt haben die Schüler die Papier-Elementarmagnete natürlich nicht. Und wegen der Einstimmigkeit ihrer Lösungsvorschläge zu dieser Aufgabe und der sich nicht ändernden Argumentationsbasis wurde sich hier gegen eine Besprechung im Plenum entschieden.

Die experimentelle Überprüfung hierzu haben die Schüler gerne durchgeführt. Abbildung 8.22 zeigt eine Lösung. Diese Aufgabe lösten alle Schülerteams korrekt. Ihr gedanklicher Ansatz und auch ihre experimentelle Überprüfung waren stringent und gut durchgeführt.



Abb.8.22: Experimentelle Überprüfung der Aufgabe 2

8.4.3 Anordnung zu einem Magneten in der Ebene

Die Aufgabe 3 lautete nun, die „Papier-Elementarmagnete“ zu einem großen, richtigen Magneten in einer Ebene anzuordnen.

In Partnerarbeit überlegten die Schüler, wie sie die Elementarmagnete zu einem Magneten sinnvoll anordnen können. Ihren Argumentationen hat die Lehrerin teilweise beim Beobachten der Problemlösung lauschen können. Natürlich wurden auch hier wieder keinerlei Hilfen gegeben. Die Schülerteams waren sehr konzentriert denkend und man fühlte eine ruhige, leicht angespannte Atmosphäre. Da hörte man den freudigen Ausruf: „Ja, ich hab’s!“

Insgesamt haben sich 12 der 15 Partnerarbeiten prinzipiell das gleiche Modell überlegt, welches exemplarisch in der Abbildung 8.23 zu sehen ist. Die übrigen drei Partnerlösungen entsprachen sich ebenfalls und sind exemplarisch in der Abbildung 8.24 abgebildet.

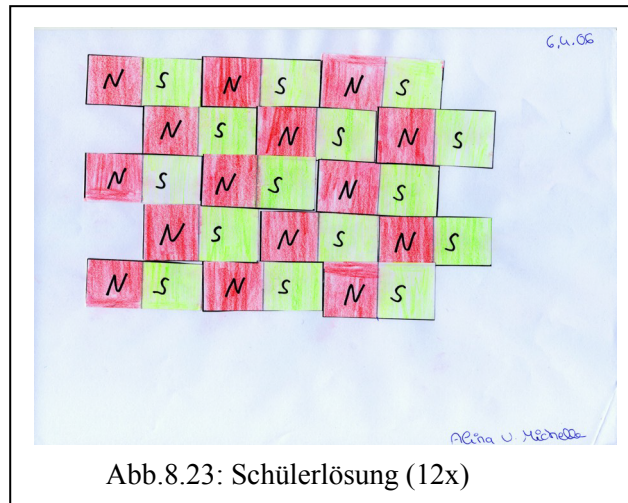


Abb.8.23: Schülerlösung (12x)

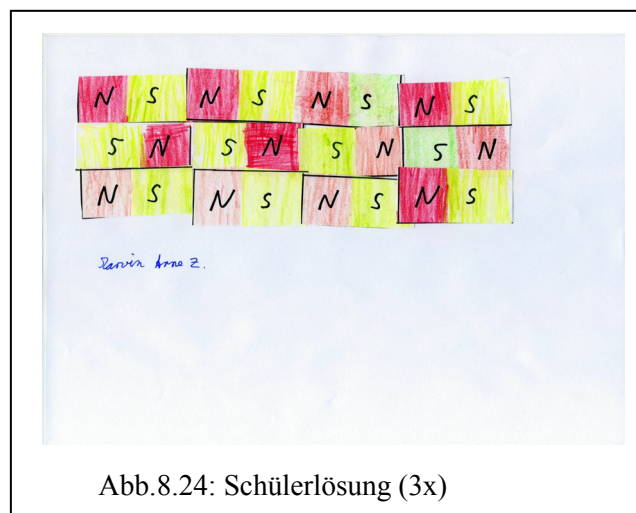


Abb.8.24: Schülerlösung (3x)

Nach dem Überlegen im Schonraum der Zweiergruppe haben die Schüler ihre Modellvorschläge den Mitschülern präsentiert. Dabei entstand eine spannende Diskussion zwischen den Verfechtern der beiden Lösungen.

Die „Diskussionen“ verlaufen im Physikunterricht prinzipiell so, dass die vortragende Person während ihres Vortrages sich meldenden Mitschülern das Wort erteilen kann. Diese können sich dann direkt auf das Gehörte beziehen, es argumentativ verstärkenden oder auf Schwierigkeiten aufmerksam machen.

Die Argumentation für die Abbildung 8.24 lautete, dass sich links der Nordpol und rechts der Südpol bilden, da dort jeweils eine Überzahl der genannten Pole vorliegt. (Diese Pole bildeten sich nach Schülermeinung nur bei ungerader Reihenanzahl aus, wie in Abbildung 8.24 mit drei Reihen angedeutet wurde.)

Als Gegenargument wurde angeführt, dass eine kleine Magnetnadel, die am „Nordpol“ entlang geführt würde, dann immer wiederkehrend ihre Richtung ändern würde, was beim „echten Nordpol“ nicht der Fall sein dürfte.

Da die Verfechter von Abbildung 8.24 dieser Aussage nicht direkt zustimmten, überprüften zwei Schüler diese Hypothese experimentell im Plenum. Das Gegenargument wurde eindeutig experimentell bestätigt.

Somit waren jetzt alle überzeugt, dass man der Magnetvorstellung (Abbildung 8.24) nicht eindeutig einen Nord- und Südpol zuordnen kann und verwarfen diesen Lösungsvorschlag.

Als Lösung einigten sie sich auf die in Abbildung 8.23 dargestellte Anordnung der Elementarmagnete zu einem großen Magneten. „Die Nord- und Südpole in der Mitte heben sich nach außen hin auf, und man sieht, dass links der Nordpol und rechts der Südpol ist“, beschrieb ein Schüler seine Überlegung und argumentierte so für sein Modell.

Die Überlegung von Abbildung 8.23 haben die Schüler experimentell mit ihren Stabmagneten überprüft, eine dieser Anordnungen ist in Abbildung 8.25 dargestellt.



Abb.8.25: Experimentelle Überprüfung der Aufgabe 3

8.4.4 Anordnung zu einem Magneten im Raum

Nachdem diese prinzipielle Anordnung der Elementarmagnete für einen großen Magneten in der Ebene gefunden war, wurden die Schüler gefragt, ob sie sich die nun anschließende Aufgabenstellung 4 schon denken könnten. Schnell kamen einige auf die Idee, den Magneten nun auch in drei Dimensionen, also im Raum, zu bauen.

Zuerst sollten sie dazu die „Papier – Elementarmagnete“ so anordnen, wie sie sich die Lösung vorstellen. Abschließend haben sie dies mit ihren Stabmagneten überprüft.

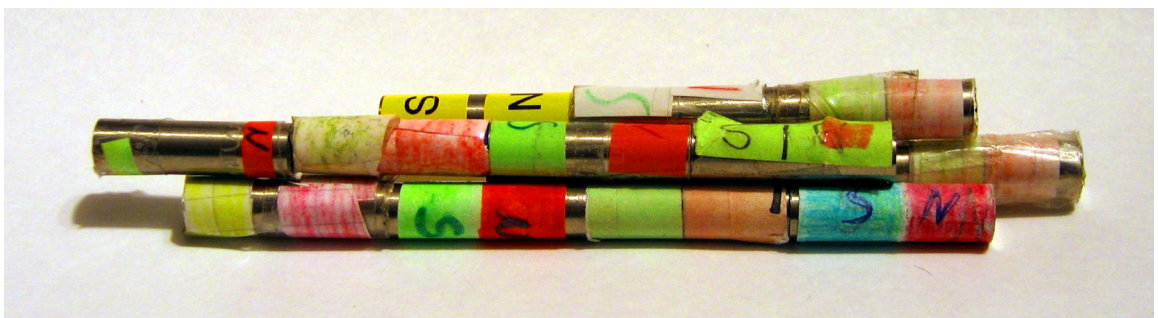


Abb.8.26: Experimentelle Überprüfung der Aufgabe 4

Nach der experimentellen Überprüfung meldete sich ein Schüler und stellte die Frage, wieso die Polenden eines gekauften Magneten „gerade“ sind, wenn die Elementarmagnete doch, wie im Experiment zu sehen, gegeneinander versetzt sind.

Direkt meldeten sich mehrer Schüler, die auf diese Frage antworten wollten. Einer sagte, dass die Elementarmagnete so klein seien, dass man die Unebenheit gar nicht sehen könnte. Ein anderer meinte, dass man unter einem Mikroskop sowieso keine glatte Oberfläche sehen würde, die hätten immer Struktur. Somit war diese Frage zur Zufriedenheit beantwortet worden.

Hätte der Schüler diese Frage nicht gestellt, so wäre sie ansonsten von der Lehrerin zu einem späteren Zeitpunkt aufgeworfen worden, um zu erfahren, wie sich die Schüler dieses Phänomen erklären bzw. ob sie es überhaupt auf Grund ihrer Vorkenntnisse erklären können.

8.5 Schülervorstellungen zur Magnetisierung von Eisen

Als nächstens wurden die Schülervorstellungen zur Magnetisierung von Eisen analysiert. Dazu erstellten die Schüler zuerst in Einzelarbeit ein Modell (Kapitel 8.5.1), anschließend haben sie im Plenum über ihre Ideen diskutiert (Kapitel 8.5.2). In Gruppenarbeit haben sie sich dann auf ein Modell geeinigt (Kapitel 8.5.3) und letztlich ihr Modell anhand verschiedener Schülerexperimente überprüft (Kapitel 8.5.4).

8.5.1 Erstellen eines Modells in Einzelarbeit

Die Schüler erhielten die Aufgabe, in Einzelarbeit aufzuzeichnen, wie sie sich die Magnetisierung von Eisen vorstellen. Dabei sollten sie unter 1. nur ein Eisenstück von Innen zeichnen und unter 2. ein Eisenstück von Innen zeichnen, in dessen unmittelbarer Nähe sich ein Magnet befindet.

Hierbei haben die Schüler ihre Präkonzepte zur inneren Struktur von Eisen aufgezeichnet. Diese Präkonzepte ähnelten den Präkonzepten der inneren Strukturen von Magneten sehr, die im Kapitel 8.2 beschrieben wurde.

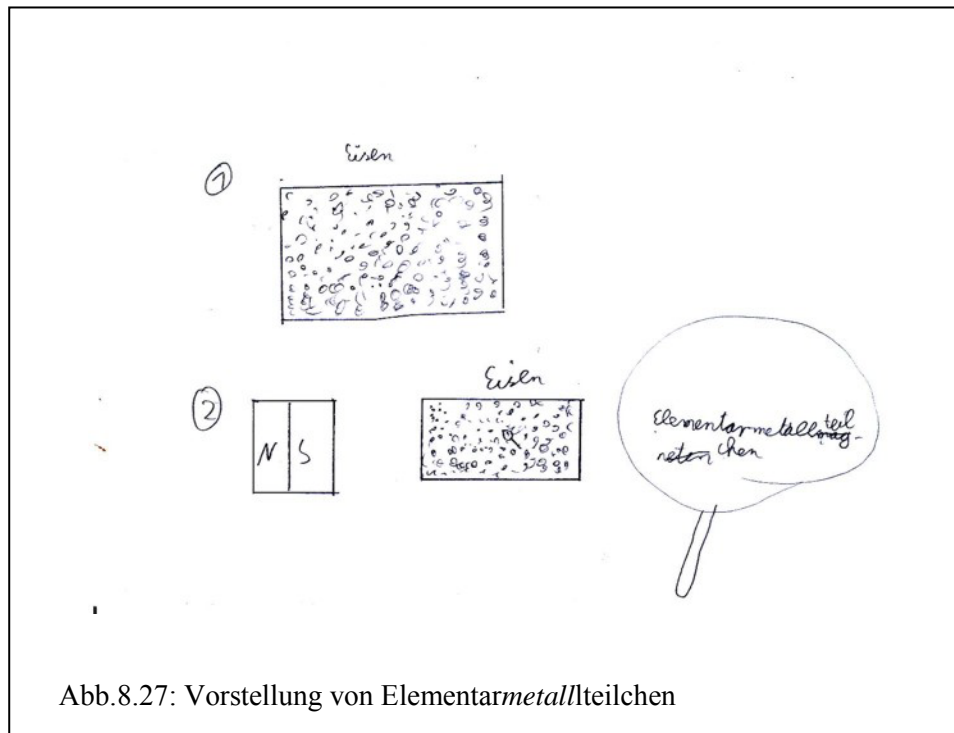
Dieser Rückgriff der Schüler auf ihre bisherigen Vorstellungen in dieser Situation ist sehr typisch. Und es überrascht nicht, dass sich nur ein geringer Anteil der Schüler Elementarmagnete im Inneren eines Eisenstückes vorstellt. Bleichroth erklärt dieses typische Verhalten von Schülern folgendermaßen:

„Martin Wagenschein dachte zwar noch an einen bruchlosen Übergang von den Schülervorstellungen zur physikalisch richtigen Deutung der Welt. Heute denkt man eher an Anknüpfung im Sinne der Erzeugung (einer....) Koexistenz.“ [BLEI91]

„Weltweit belegen alle Untersuchungen dazu, dass eine Koexistenz das Optimum des Erreichbaren darstellt, eine Verdrängung der Alltagsvorstellungen ist nur in wenigen Ausnahmefällen erreichbar, und es darf bezweifelt werden, ob sie überhaupt wünschenswert ist.“ [BLEI91]

Insofern ist das Verfahren der Schüler, das Zurückgreifen auf ihre bisherigen mentalen Modelle, in dieser Situation sehr typisch.

Logisch schlussfolgernd wurde die Schüleridee bewertet, dass sich parallel zu den Elementarmagnetteilchen im Magneten nun Elementarmetallteilchen im Metall befinden könnten (siehe Abbildung 8.27).



8.5.2 Diskussion im Plenum

Die Schüler durften nun ihre Vorstellung zur Magnetisierung von Eisen im Plenum vorstellen. Dabei herrschte wieder die im Kapitel 8.4.3. beschriebene Diskussionskultur.

Eine protokollierte Diskussion der Klasse 6 wird hier exemplarisch wiedergeben.

Begonnen hatte ein Schüler mit der Vorstellung, die in Abbildung 8.28 dargestellt ist.

1. Finn: „Im Eisen sind einzelne Pole verstreut. Die sich, wenn sie an einen Magneten kommen, dann ...*(deutet auf seine Zeichnung)* der Magnet zieht sie alle auf eine Seite.“

2. Arne Z.: „Aber die einzelnen Pole würden sich doch gegenseitig abstoßen.“

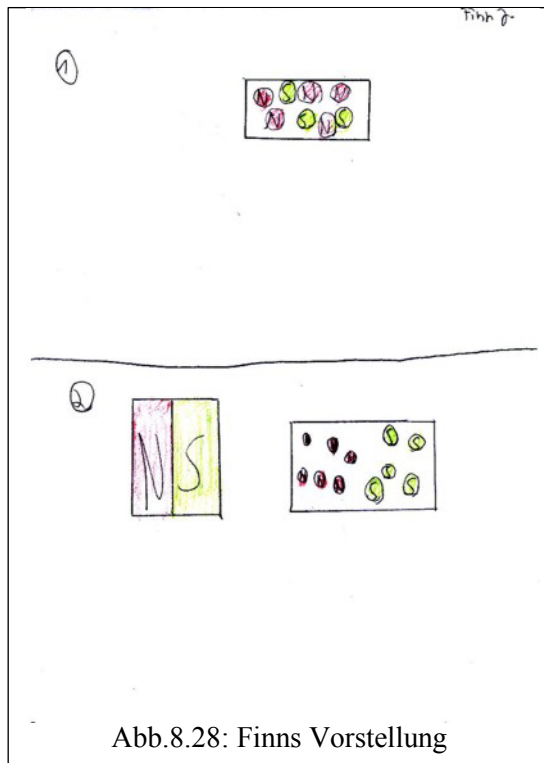


Abb.8.28: Finns Vorstellung

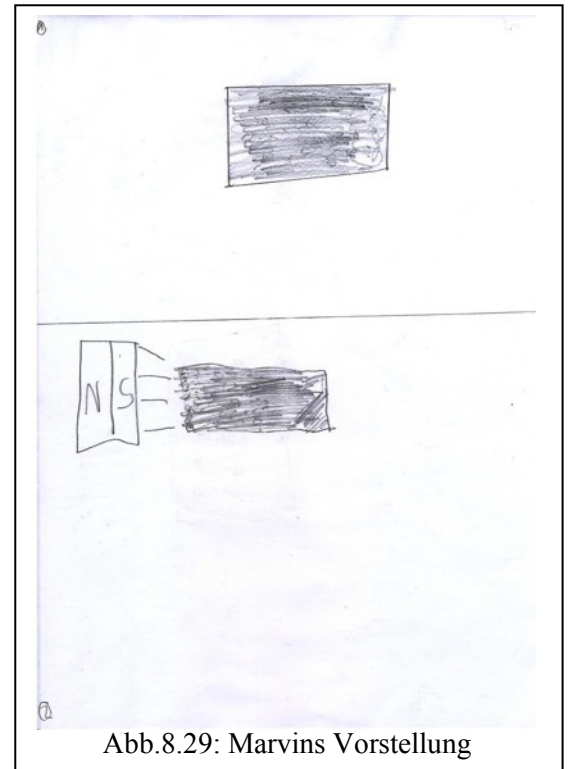


Abb.8.29: Marvins Vorstellung

3. Lena: „Und außerdem gibt es diese Pole doch nicht alleine.“

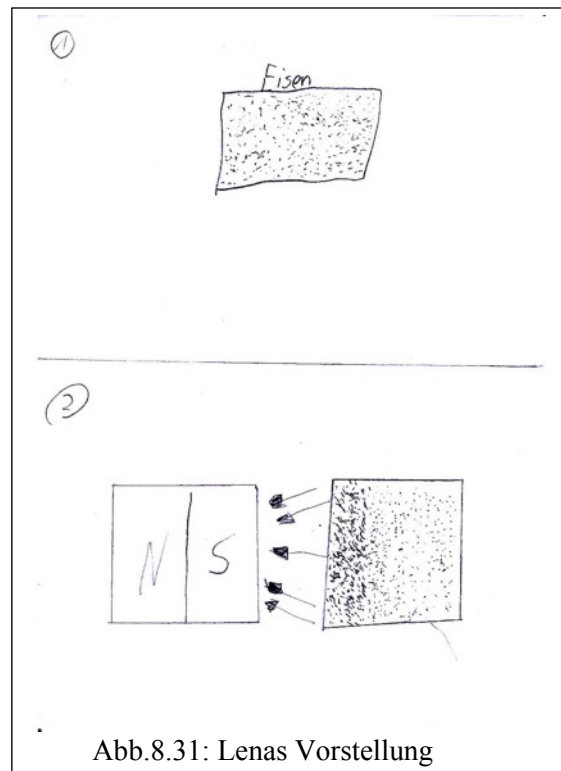
Die Schüler sind mit den Einwänden einverstanden, und beschlossen, dass diese Variante (Abbildung 8.28) nicht die Lösung sein konnte.

Marvins Vorschlag (Abbildung 8.29):

4. Marvin: „Das Eisen sieht beides Mal genauso aus (*deutet auf sein Bild*), deshalb verschieben sie sich nicht.“
5. Kai: „Wie soll der Magnet denn das Eisen anziehen, wenn da (*im Eisen; Anmerkung der Autorin*) gar nichts zum Anziehen drin ist.“
6. Marvin: „Da sind Moleküle drin.“

[Der Begriff „Moleküle“ würde bisher im Physikunterricht nicht eingeführt oder verwendet.]

Benno: „Eisenspäne sind im Eisen drin, wenn der Magnet da ist, werden sie angezogen, es entsteht ein Hohlraum.“ (*deutet auf seine Zeichnung, Abbildung 8.30*).

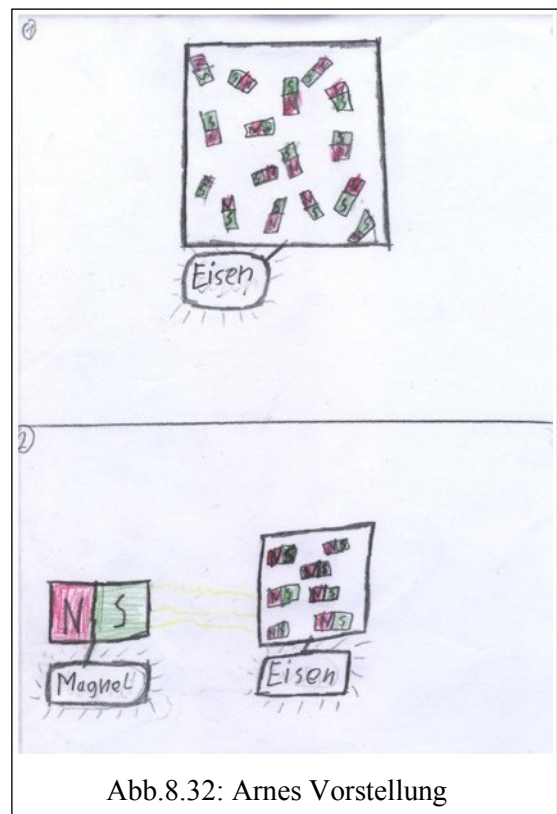


7. Lena: „Nein, Hohlraum kann nicht sein, es sind nur ein paar mehr „Eisenspränkel“ auf der einen Seite, es besteht ja nicht nur aus diesen Teilchen.“
(weist auf ihre Zeichnung, Abbildung 8.31)

8. Arne S.: „Ich denke, da im Eisen sind auch Elementarmagnete drin. Und die bewegen sich im Eisen.“
(zeigt auf seine Zeichnung, Abbildung 8.32)

9. Sonja: „Die linke Seite vom Eisen (Abbildung 8.32) ist der Nordpol, die rechte Seite der Südpol, dann muss das Eisen auch magnetisch sein.“

10. Felix: „Nein, dann würde es doch Magnet heißen, und nicht Eisen“.



11. Sonja: „Das kann man doch mit einem Experiment überprüfen. Frau Holtschneider können wir?“

Um den Gedankengang in der Praxis zu untersuchen, erhielt jeder Schüler aus der Physiksammlung mehrere Eisenstücke (in Form von Büroklammern). Sonja stellt ihre Idee dazu mit einer Skizze an der Tafel vor, und alle Schüler führten das Experiment durch.

Die Schülerbeobachtung ergab, dass eine Büroklammer, die von einem Magneten angezogen wird, tatsächlich selbst wie ein Magnet wirkt, und eine weitere Büroklammer anziehen kann.

12. : Lena: „Die Büroklammer ist nur mit dem Magnet wie ein Magnet.“
13. Felix: „Nein, meine Büroklammer ist jetzt auch so (*deutet auf den Versuch in seiner Hand*) ein Magnet.“ [*Er hatte nur die obere Büroklammer ohne Magnet in der Hand, und die untere blieb an ihr hängen.*]
14. Lara: „Du hast Kleber dran getan.“
15. Felix: „Nein, Probier doch selber!“

Dieser erweiterte Versuch wurde nun von allen Schülern durchgeführt. Da er jedoch sehr viel Fingerspitzengefühl verlangt, klapperte er nicht bei allen Schülern im ersten Versuch. Nach dem Experiment wurde die Diskussion fortgesetzt, denn Giulia wollte gerne noch etwas kommentieren.

16. Giulia: „Aber die (*deutet auf die Elementarmagnete im Eisen von Arnes S. Modell*) ziehen sich doch an.“
17. Dennis: „Ja, aber, müssten die Elementarmagnete dann nicht aneinander stoßen?“
18. Ellen: „Nein, in Wirklichkeit sind die Elementarmagnete viel kleiner und nicht eckig. Sie stoßen sich nicht.“

8.5.3 Einigen auf ein Modell in Minigruppen

Im Anschluss an die gelungene Diskussion hatten die Schüler in Teams die Aufgabe, sich auf eine Erklärung zur Magnetisierung von Eisen zu einigen und diese aufzuzeichnen. Die Zeichnungen der Gruppen ergaben ein eindeutiges Ergebnis für ein Modell. Eine Zeichnung ist in Abbildung 8.33 dargestellt.

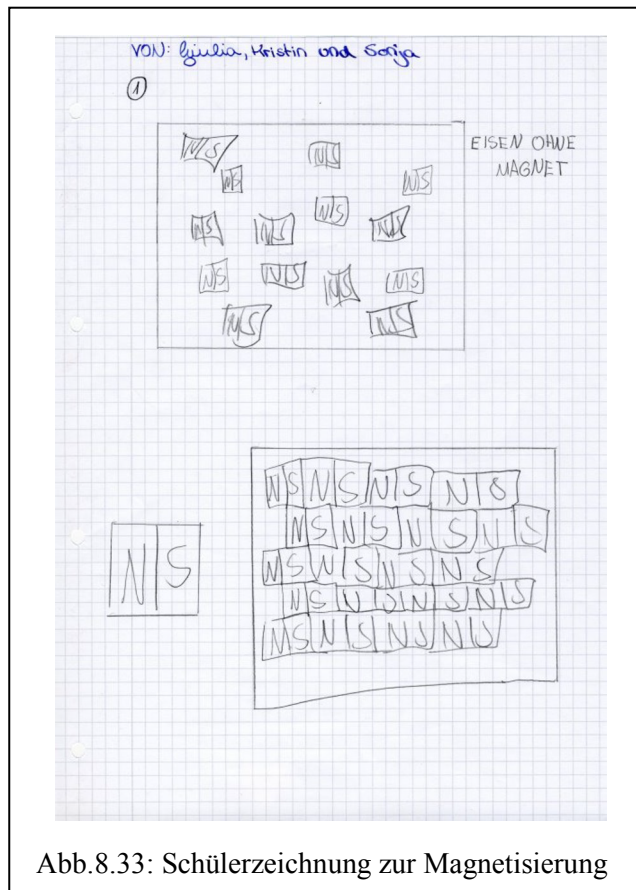


Abb.8.33: Schülerzeichnung zur Magnetisierung

Im Folgenden wurde als Lehrer-Demonstrations-Experiment ein Nagel, der auf Grund der Anziehungskraft eines Magneten zur Seite ausgelenkt war, mit einem Bunsenbrenner erwärmt, bis er dadurch zurück in die Senkrechte fiel (ähnlich Abbildung 8.34).

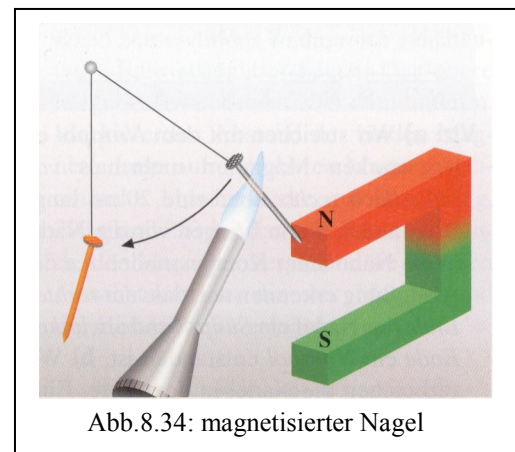


Abb.8.34: magnetisierter Nagel

Die Schüler kamen, durch den Versuch inspiriert, zur Erkenntnis, dass die ausgerichtete Anordnung der Elementarmagnete durch sehr große Erwärmung wieder in eine zufällige Anordnung zerfällt²⁵.

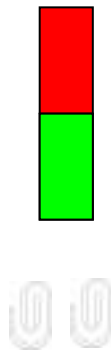
²⁵ In diesem Zusammenhang wurde der Begriff der Curie-Temperatur thematisiert.

Durch weitere Lehrerfragen motiviert, kamen sie auf die Idee, dass auch ein Sturz aus großer Höhe diesen Effekt des Entmagnetisierens hervorrufen kann. Dieses durften die Schüler aber natürlich nicht mit den ausgeteilten Magneten experimentell überprüfen.

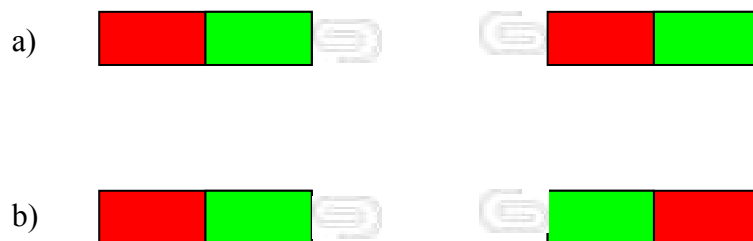
8.5.4 Schülerexperimente zur Überprüfung des gefundenen Modells

Nach dieser Erarbeitungs- und Sicherungsphase zur Magnetisierung von Eisen haben die Schüler in Teams zwei Transfer-Aufgaben zur Magnetisierung von Eisen erhalten. Dabei sollten sie den Versuch zuerst in Gedanken ausführen, produktiv denken, und anschließend ihr Ergebnis eigenständig in der Praxis überprüfen bzw. verifizieren.

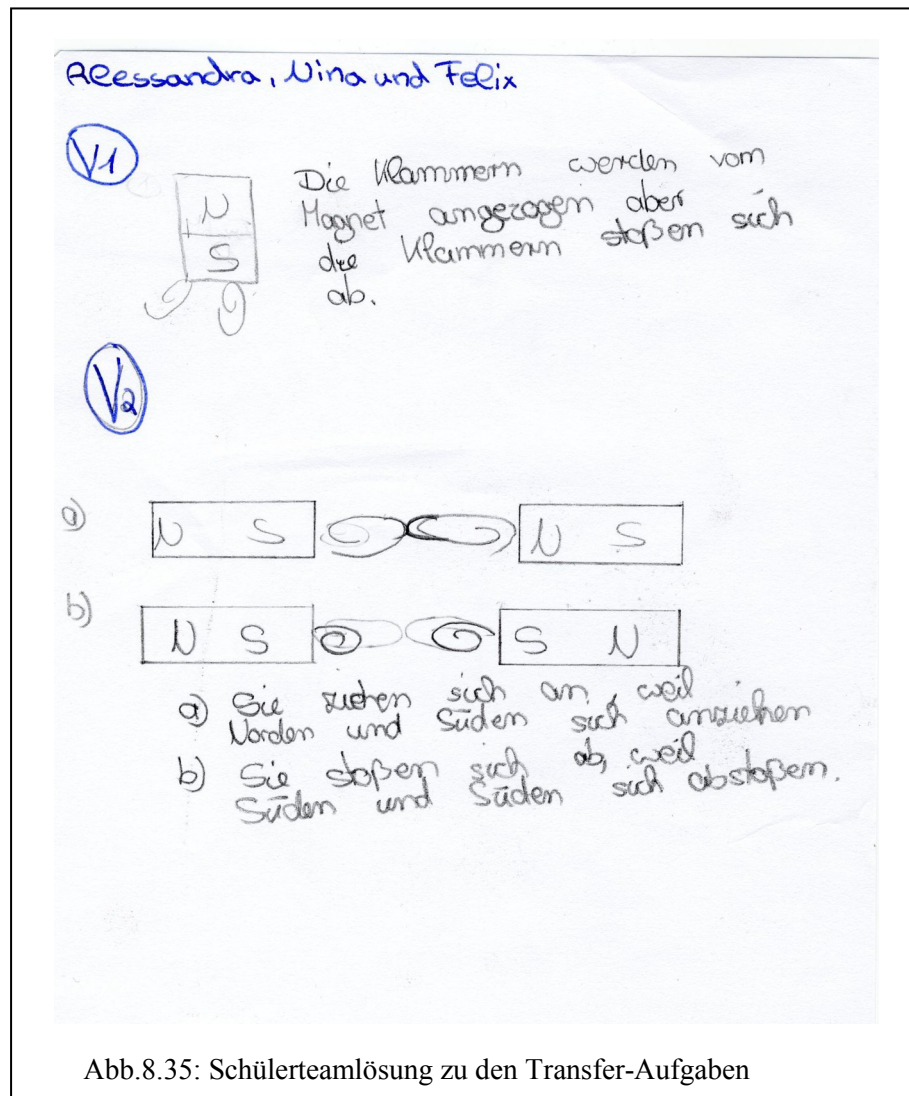
1. Aufgabe: Zwei Büroklammern liegen parallel nebeneinander. Was geschieht, wenn man den beiden Klammern von ihrer Kopfseite her einen Stabmagneten nähert?



2. Aufgabe: Zwei Magnete, die jeweils eine Büroklammer anziehen, liegen auf einem Tisch und werden mit ihren beiden Büroklammerseiten aufeinander zu geschoben. Was passiert im Fall a) und b)?



Alle Schülergruppen haben diese Aufgaben richtig gelöst. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sie diesen Sachverhalt bis in der Tiefe verstanden haben. Eine Lösung dieser Transfer-Aufgaben ist in der Abbildung 8.35 exemplarisch abgebildet.



9. Kapitel

Überprüfung der Wirksamkeit des alternativen Elementarmagneten-Modells

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit des alternativen Elementarmagneten-Modells für die Unterrichtspraxis überprüft und reflektiert. Dazu wurden eine Lernerfolgs-Kontrolle und eine Evaluation mit den Schülern durchgeführt.

9.1 Lernerfolgs-Kontrolle

9.1.1 Aufbau

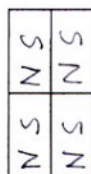
Diese Lernerfolgs-Kontrolle (siehe Abbildung 9.1) wurde bewusst nicht angekündigt, um den „aktuellen Wissensstand“, der sich tatsächlich aus dem alternativen Elementarmagneten-Modell und den ihn umschließenden Unterricht ergibt, zu erfassen. Der Lernerfolgs-Kontrollbogen besteht aus 7 Aufgaben, die verschiedene Kompetenzen abprüfen.

Aufgabe 1 ist sehr komplex und überprüft die Flexibilität und Freiheit in Gedankengängen sowie das Denken in großen Strukturen. Diese Aufgabe ist so aufgebaut, dass sie, je nach physikalischer, kognitiver Entwicklung des Schülers bezüglich eines, zwei oder drei Merkmalen betrachtet und gelöst werden kann. Diese Aufgabe ist die schwierigste von allen.

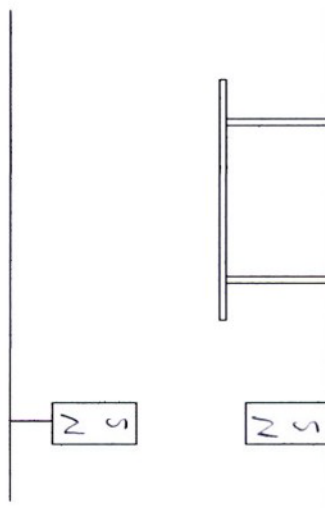
Aufgabe 2 überprüft den Transfer der Schüler. Diese Aufgabe ist völlig neu für die Schüler und soll zeigen, ob die Schüler in der Lage sind, phantasievoll und ideenreich eine Aufgabe zum Magnetismus zu lösen.

Name: _____ Ho _____

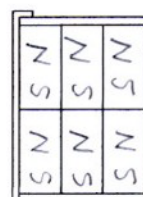
- 1) Die in der Abbildung 1 gezeigten einzelnen Magnete sowie die Büroklammer liegen auf Styropor schwimmend auf Wasser und werden in dieser Ausgangsposition festgehalten. Was passiert, wenn man sie loslässt?



- 2) Ein Magnet ist beweglich an der Zimmerdecke befestigt (s. Abb. 2). Deine Aufgabe ist es, diesen Magneten nach rechts auszulenken. Dazu darfst du höchstens zehn Magnete benutzen. Der Tisch sowie der auf dem Boden stehende Magnet dürfen dabei nicht verschoben werden.



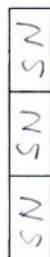
- 3) Die sechs Magnete liegen in einer verschlossenen Kiste (s. Abb. 3). Passiert etwas, wenn man diese Kiste oben öffnet?



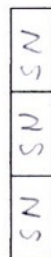
- 4) Du möchtest die drei Magnetreihen (s. Abb. 4) übereinander stapeln. Markiere in jeder Magnetreihe einen der Magnetpole, die übereinander liegen.



(1. Reihe)

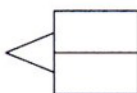


(2. Reihe)

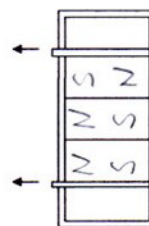


(3. Reihe)

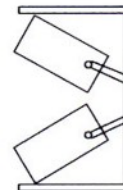
- 5) Trage jeweils den Nord- und Südpol in die beiden an einem Faden hängenden Magnete ein.



- 6) In einer Kiste befinden sich drei Magnete (s. Abb. 6). Passiert etwas, wenn man das linke Trennbrett nach oben herauszieht? Passiert etwas, wenn man das rechte Trennbrett nach oben herauszieht?



- 7) Zwei Magnete sind drehbar an einem Kistenboden fixiert (s. Abb. 7). Wo befinden sich Nord- und Südpole beider Magnete, wenn sie sich selbst in folgender Weise ausrichten.



Die Aufgabe 3 legt ihren Schwerpunkt darauf, zu beleuchten, ob sich Schüler, wenn sie sich bewusst mit dem Thema des Magnetismus und dem des alternativen Elementarmagneten-Modell auseinander gesetzt haben, die physikdidaktische Problematik des Modell I (siehe Kapitel 6.2.1) als kognitiven Konflikt, als Perturbation wahrnehmen, oder ob sie getrost über diese Schwierigkeit hinwegsehen.

Aufgabe 4 überprüft den rein reproduktiven Teil. Die Lösung dieser Aufgabe zeigt, ob physikalisches Fachwissen durch die Unterrichtsreihe rund um das alternative Elementarmagneten-Modell gewonnen wurde.

Die Aufgaben 5, 6 und 7 letztlich sind wie die Aufgabe 2 Transferaufgaben. Sie dienen der indirekten Fokussierung der semantischen Netzwerke und kognitiven Strukturen der Schüler. Denn nur, wenn das Wissen zum Magnetismus überhaupt in solchen Repräsentanten gespeichert ist, können kognitiv, auf diese Basis aufbauend, überhaupt Transferaufgaben bewältigt werden. Umgekehrt lässt sich jedoch nicht aus dem Nichtlösen dieser Aufgaben das Fehlen dieser kognitiven Ausbildung ableiten. Dazu benötigt es nämlich noch Schritte über das deklarative Wissen hinaus (siehe ACT-Theorie; Kapitel 5.4.3).

9.1.2 Auswertung

Wie bereits kurz dargelegt, ist die Aufgabe 1 sehr komplex und stellt eine besondere Herausforderungen für die Schüler dar. Zur vollständigen Beantwortung mussten folgende drei Teilaspekte berücksichtigt werden:

- 1) Die beiden Magnetreihen stoßen sich ab.
- 2) Die Büroklammer wird von der unteren Magnetreihe angezogen.
- 3) Die beiden Magnetreihen richten sich im Erdmagnetfeld aus.

Angesichts der Komplexität dieser Aufgabe und der Tatsache, dass keine Angabe zum Erdmagnetfeld gemacht wurde, war das Schülerergebnis sehr beeindruckend. Erwartet wurde, dass hauptsächlich einer der drei Aspekte von den Schülern genannt würde. Tatsächlich haben aber relativ viele Schüler (26 von 60) die zwei Aspekte 1) und 2)

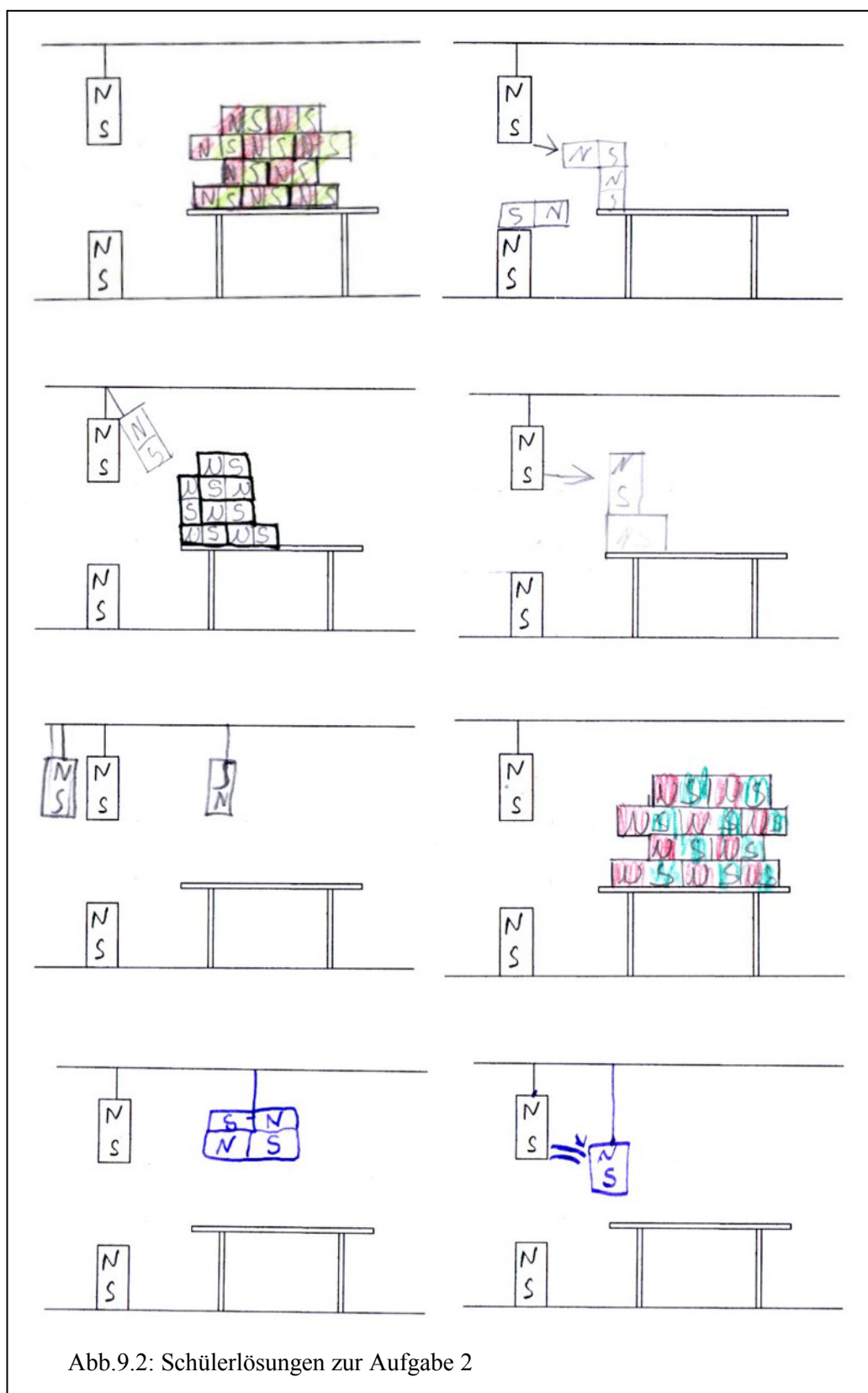
beachtet. Hingegen nur sehr wenige, 2 von 60 Schülern, spürten den Aspekt 3) auf. Dies stellt eine besondere geistige Leistung dar!

Mit Aufgabe 2) sollte überprüft werden, ob die Schüler durch das eigenständige Experimentieren mit den Magneten in der Lage sind, offene, divergente und komplexe Aufgaben wie diese zu lösen. Dazu mussten die Schüler den grundlegenden physikalischen Zusammenhang verstanden haben. Zudem mussten sie eigenständig neue Wege gehen, eigene Ideen im Kopf durchspielen und Lösungen finden. Somit stellt diese Aufgabe einen hohen Anspruch an den Transfer der Schüler.

Die Menge und Vielfalt der richtigen Schülerlösungen war beeindruckend! Die Schüler sind auf die kreativsten Ideen gekommen, einige sind exemplarisch in der Abbildung 9.2 dargestellt.

88% (53 von 60) Schüler haben bei der Aufgabe 2) eine durchaus sinnvolle Lösungsvariante vorgeschlagen. Einige haben jedoch nicht ganz die Stabilität ihrer Anordnung berücksichtigt (siehe Abbildung 9.2). Der grundlegende physikalische Ansatz ist jedoch richtig vorhanden gewesen.

Mit der Aufgabenstellung 3, die aufzeigen sollte, ob die Schüler die physikdidaktische Problematik des Modell I (siehe Kapitel 6.2.1) als kognitiven Konflikt wahrnehmen, gab es bei der ersten Lerngruppe ein Verständnisproblem. Einige sahen die Abbildung 3 nicht als Querschnitt einer Kiste an, in der drei Magnetreihen übereinander liegen, sondern nahmen sie als Blick von oben, aus der Vogelperspektive, auf die Kiste wahr. Da diese Sichtweise nicht intendiert wurde, erhielt die zweite Lerngruppe zu dieser Aufgabe den Hinweis, dass sich „der Kistenboden unten, und der Deckel oben“ befindet. Das Gesamtergebnis muss deshalb getrennt betrachtet werden. 19 von 30 Schülern der ersten Lerngruppe und 27 der 30 Schüler der zweiten Lerngruppe lösten diese Aufgabe korrekt.



Die Aufgaben 4) bearbeiteten 56 der 60 Schüler einwandfrei. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis der Reproduktionsaufgabe und belegt, dass die Schüler die Thematik sehr gut verstanden haben.

Die Transferaufgaben 5), 6) und 7) konnten fast durchgängig von allen Schülern korrekt gelöst werden. In Absolutzahlen ausgedrückt, 56 von 60 Schüler lösten die Aufgabe 5), 54 von 60 die Aufgabe 6), und 57 von 60 die Aufgabe 7). Somit kann festgestellt werden, dass die Schüler mit dem alternativen Elementarmagneten-Modell und dem umschließenden Unterricht in der Lage sind, einen gedanklichen Transfer zum Magnetismus auszuführen.

Abschließend kann somit festgehalten werden, dass das Ergebnis der Lernerfolgs-Kontrolle belegt, dass die Schüler die physikalischen Sachzusammenhänge mittels des alternativen Elementarmagneten-Modells in der notwendigen Tiefe durchdrungen haben, um solche offenen, komplexen und Transfer-Aufgabenstellungen eigenständig zu beantworten.

Hiermit ist keine vergleichende Komponente zu den Modellen I und II beabsichtigt. Es sollte lediglich überprüft werden, ob das alternative Elementarmagneten-Modell einen Lernerfolg bezüglich solcher Aufgaben und Kompetenzen herbeiführen kann. Dies konnte nachgewiesen und bestätigt werden.

9.2 Evaluation

9.2.1 Aufbau

Der Evaluationsbogen (Abbildung 9.3) zu der Unterrichtseinheit rund um das alternative Elementarmagneten – Modell besteht aus 5 Fragen. Jede dieser Fragen sind als „Ich-Aussagen“ aus Schülersicht formuliert.

Die Schüler können ihnen, gestaffelt in *vier* Stufen, jeweils vollkommen zu- oder widersprechen. Es wurden bewusst nicht fünf Stufen angegeben, um das Ankreuzen in der Mitte, ohne Tendenz, im Kern zu vermeiden.

Um gegebenenfalls mögliche Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen in der persönlichen Wahrnehmung einzelnen Evaluationsbereichen ausfindig zu machen, sollten die Schüler bei dem Evaluationsbogen zudem ihr Geschlecht ankreuzen.

Fragebogen:

m / w

- 1) Ich habe das Gefühl, das Thema Magnetismus, insbesondere das Elementarmagneten-Modell, gut verstanden zu haben.

☐ trifft auf jeden Fall zu
☐ trifft fast zu
☐ trifft kaum zu
☐ trifft gar nicht zu
- 2) Ich habe mir gerne Argumente für meine Vorstellung vom Magneten überlegt und andere Überlegungen widerlegt bzw. unterstützt.

☐ trifft auf jeden Fall zu
☐ trifft fast zu
☐ trifft kaum zu
☐ trifft gar nicht zu
- 3) Ich habe gerne den Überlegungen anderer Gruppen zugehört und war an ihrem Ergebnis interessiert.

☐ trifft auf jeden Fall zu
☐ trifft fast zu
☐ trifft kaum zu
☐ trifft gar nicht zu
- 4) Ich habe gerne meine Überlegungen in der Praxis mit Magneten überprüft.

☐ trifft auf jeden Fall zu
☐ trifft fast zu
☐ trifft kaum zu
☐ trifft gar nicht zu
- 5) Ich bin gespannt, ob die Forscher eines Tages einen magnetischen Monopol finden werden.

☐ trifft auf jeden Fall zu
☐ trifft fast zu
☐ trifft kaum zu
☐ trifft gar nicht zu

Abb.9.3: Evaluationsbogen

Die Frage 1) bezieht sich auf die Selbsteinschätzung der Schüler zu ihrem Kenntnisstand. Natürlich kann die Selbstwahrnehmung von der Fremdwahrnehmung bzw. der Wirklichkeit abweichen, jedoch sagt das eigene Verständnisgefühl, das Schüler einem Inhalt gegenüber empfinden, auch etwas über ihren wirklichen Kenntnisstand und ihre Emotionen diesbezüglich aus.

Die Frage 2) erfragt das Interesse an der aktiven Auseinandersetzung der Schüler mit dem Thema der Anordnungen der Elementarmagnete. Haben sie sich gerne Argumente, pro und contra, für verschiedene Theorien überlegt? Haben sie letztlich gerne nachgedacht, produktiv gedacht?

Im Vergleich zur Frage 2), die das Interesse an einer *aktiven* Auseinandersetzung ermitteln möchte, fokussiert die Frage 3) das prinzipielle Interesse an diesem Thema, aber im Vergleich eher das *passive* Interesse. Hiermit soll ermittelt werden, ob ein Interesse an sich vorliegt.

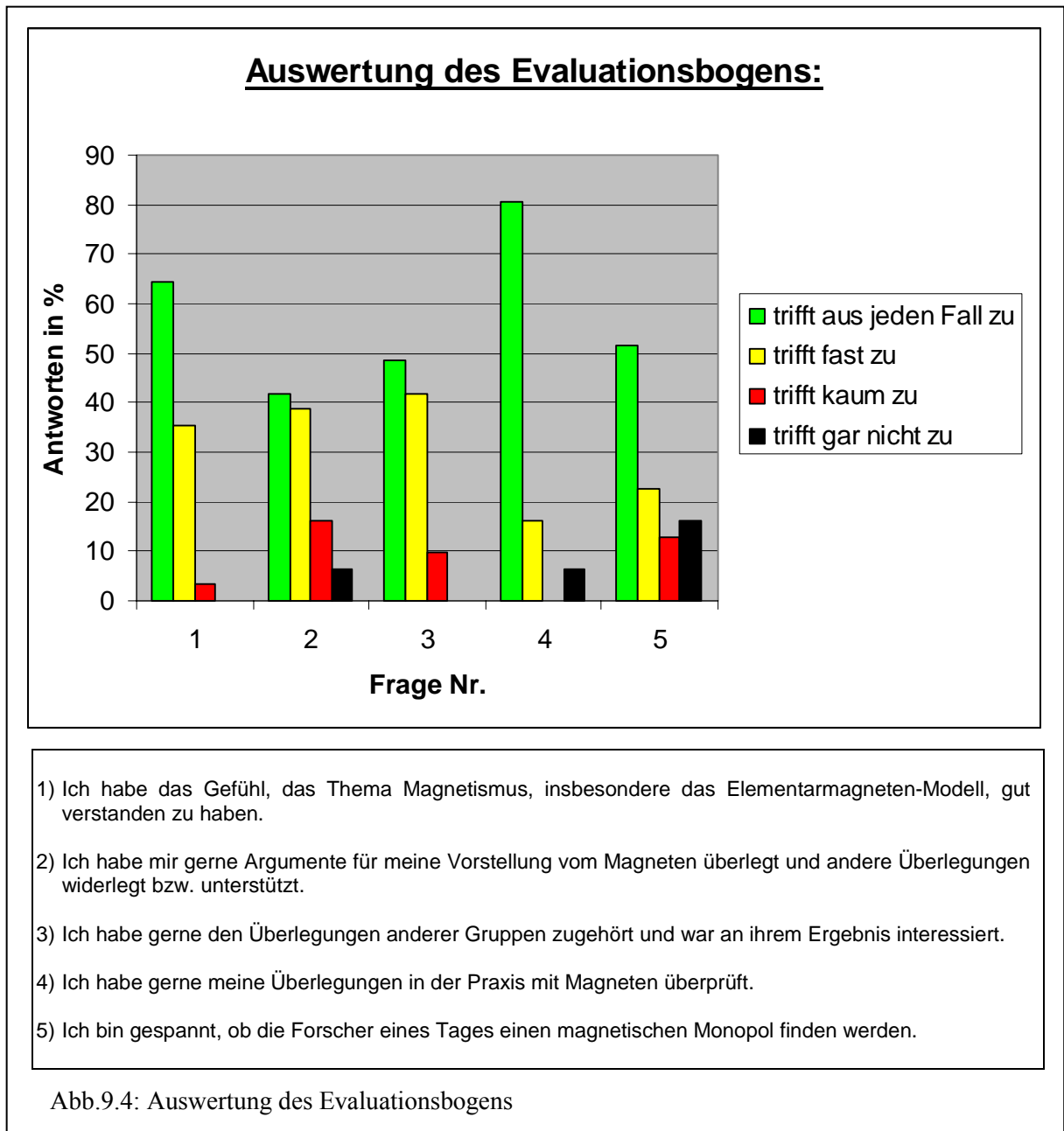
Die Frage 4) eruiert die Freude am eigenständigen Experimentieren. Hat dieser haptische Zugang zu der Physik und seinen Elementen den Schülern Vergnügen bereitet, sie motiviert?

Die Frage 5) soll erfassen, ob die Unterrichtseinheit ein echtes Interesse an der Physik, an der aktuellen Forschung der Physik im Bereich des Magnetismus, hervorgerufen hat. Dies ist natürlich ein sehr hohes Ziel, aber m. E. ist es wichtig, die Spannung der Wissenschaft Physik aufrechtzuerhalten. Wohl ist bekannt, dass ca. 90% der Schüler später keinen Beruf hinsichtlich der Physik ausüben [BORN83], aber insgesamt ist dennoch die Erhaltung der Spannung an der Physik für eine positive Gesamtatmosphäre im Physikunterricht unabdingbar.

9.2.2 Auswertung

Die Ergebnisse der Evaluation sind in der Abbildung 9.4 dargestellt. Da es keine signifikanten Unterschiede in der Wahrnehmung der Mädchen und Jungen gab, wurde keine unnötige Geschlechterspezifikation in der Darstellung vorgenommen.

Die Selbsteinschätzung der Schüler zu ihrem Kenntnisstand aus der Frage 1) des Evaluationsbogens deckt sich mit dem Ergebnis der Lernerfolgs-Kontrolle. Lediglich zwei Schüler meinten, dass sie den Inhalt *kaum* verstanden habe. Dies ist insgesamt ein sehr gutes Ergebnis.



Die Antworten auf Frage 2) zeigen, dass etwa 80% der Schüler sich gerne Argumente zu den Anordnungen der Elementarmagnete ausgedacht haben, und somit gerne produktiv dachten. Dies alleine stellt schon ein sehr positives Ergebnis dar.

Es gab aber auch einige wenige Schüler, die nicht gerne diese entdeckenden Denkvorgänge und Diskussionen durchführten. Im Vergleich zu den Antworten auf Frage 3) wird deutlich, dass diese Schüler sich ungerne *aktiv* an den Diskussionen beteiligen, schon aber weitestgehend ein *passives, rezeptives* Interesse an den Lösungsideen der Mitschüler haben.

Hierzu ist festzuhalten, dass natürlich versucht wird, auch bei den etwas ruhigeren Schülern ein Interesse an der *aktiven* Teilnahme solcher Diskussionen zu erwecken. Dies ist jedoch nicht einfach, da es prinzipiell ihrer Persönlichkeit widerspricht. Vielleicht ist es für diese Schüler sinnvoll, sich erst einmal im Schonraum der Gruppe *aktiv* zu erproben.

Die Antworten auf Frage 4) sind ganz eindeutig. Das eigenständige Überprüfen und Experimentieren mit den Stabmagneten hat den Schülern Freude bereitet. Diese haptische Zugangsmöglichkeit sollte man also weiterhin den Schülern bieten und ist ein eindeutiger Vorzug des alternativen Elementarmagneten-Modells.

Die Frage 5) sollte erfassen, ob die Unterrichtseinheit ein echtes Interesse an der aktuellen Forschung der Physik im Bereich des Magnetismus hervorgerufen hat. Und man kann sehr zufrieden sein, dass über 50 % der Schüler *auf jeden Fall* eine Begeisterung für diese konkrete Fragestellung entwickelt haben. Es ist nämlich, wie gesagt, wichtig, die Spannung der Wissenschaft Physik und ihrer aktuellen Forschungsgebiete aufrecht zu erhalten.

Mit dieser Aussage zum Interesse der Schüler auf Grund des Unterrichtes zum alternativen Elementarmagneten-Modells ist keine komparative oder negative Aussage bezüglich der Modelle I und II impliziert. Es wurden lediglich die Folgen des alternativen Modells aus Sicht der Schüler evaluiert.

Zusammenfassend kann deshalb auf Grund der Ergebnisse der Evaluation festgestellt werden, dass die Schüler das Thema Magnetismus gut verstanden haben und sich auch gerne aktiv, produktiv denkend, (80%) mit ihm auseinandergesetzt haben. Das passive Interesse liegt prozentual noch höher. Zudem hat insbesondere das Experimentieren und Verifizieren der eigenen Hypothesen den Schülern sehr große Freude bereitet, was auch im Unterrichtsgeschehen von der Lehrkraft so erlebt werden konnte. Somit lässt sich mittels der Lernerfolgskontrolle und der Evaluation feststellen, dass die Unterrichtseinheit zur Erprobung des alternativen Elementarmagneten-Modells die Schülerkompetenzen in fachlicher, produktiv denkender, und experimentell motivierender Hinsicht gestärkt hat.

10. Kapitel

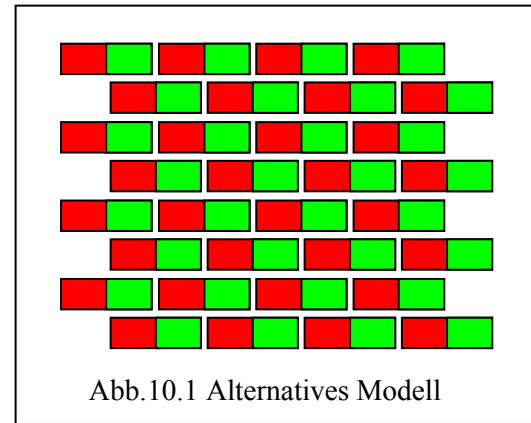
Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wird ein neues alternatives Elementarmagneten-Modell entwickelt. Dies war notwendig, da die zwei Varianten des zurzeit in der Schule unterrichteten und in den Schulbüchern beschriebenen Elementarmagneten-Modells gravierende Mängel aufweisen.

Wie eine ausführliche Analyse anhand der Kriterien der Elementarisierung zeigt, ist die eine Variante des klassischen Modells weder fach-, noch schüler-, noch zielgerecht. Dies liegt darin begründet, dass das Modell den physikalischen Kenntnissen widerspricht. Die andere Variante ist zwar fachgerecht, aber kaum schüler- und zielgerecht ist. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass es sich nicht an den mentalen Modellen der Schüler orientiert und daher zu abstrakt ist.

Auf Grund dieser schlechten Analyseergebnisse wurde ein alternatives Elementarmagneten-Modell entwickelt. Hierbei wurden Erkenntnisse aus der Physikdidaktik, der Physikgeschichte sowie dem aktuellen Stand der Wissenschaft zum Thema Magnetismus, Erkenntnisse der Kognitionspsychologie, der Entwicklungspsychologie und der Pädagogik zu Grunde gelegt. Die Stärke dieses alternativen Modells liegt darin, dass die Schüler sich eigenständig, nur aufbauend auf ihren eigenen, bisher gewonnenen Kenntnissen zum Magnetismus, dieses Modell zur Erklärung magnetischer Phänomene erschließen können, da es direkt an ihren mentalen Modellen anknüpft.

Dies wird dadurch erreicht, dass die Elementarmagnete wie in der nebenstehenden Abbildung angeordnet sind. Ohne physikalische Widersprüche und kognitive Überforderungen kann die Anordnung von Schülerinnen und Schülern wirklich nachgebaut und somit nachempfunden werden. Dieses Modell ist im vollen Maße fach-, schüler- und zielgerecht.

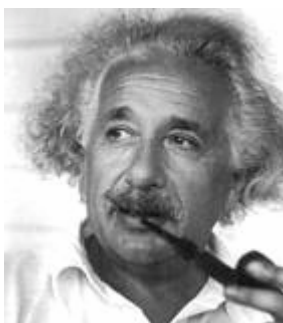


Das neue alternative Modell wurde nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Unterrichtspraxis an zwei Lerngruppen (62 Schülern) der Jahrgangstufe 6 an Gymnasien in Nordrhein-Westfalen erprobt. Wie schülergerecht das alternative Modell ist, zeigte sich durch die Tatsache, dass die Schüler alleine - nur mittels eigenständigem produktiven Denken und experimenteller Überprüfung - auf die Anordnung der Elementarmagnete gekommen sind, die im neuen Modell vorgeschlagen wird.

Die positive Wirkung des neuen alternativen Modells wurde nicht zuletzt durch die sehr guten Ergebnisse der abschließend durchgeführten Lernerfolgs-Kontrolle und Evaluation bestätigt.

Mir persönlich ist es ein Anliegen, meine Freude beim Entwickeln dieses alternativen Elementarmagneten-Modells und meine Spannung auf das Ergebnis der unterrichtspraktischen Erprobungen zum Ausdruck zu bringen.

Es wäre wünschenswert, wenn das alternative Elementarmagneten-Modell Eingang in die Physikdidaktik und somit in die Schulbücher finden würde.

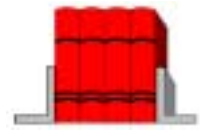


Abschließen möchte ich die Dissertation mit einem Zitat von Albert Einstein, das nicht nur für Schüler gilt.

"Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu fragen."

[MILL55]

Literaturverzeichnis



Alphabetische Anordnung:

- [ANDE96] Anderson, J. R. (1996): Kognitive Psychologie. Spektrum — Akademischer Verlag, 2.Auflage. Heidelberg, Berlin, Oxford.
- [BALM56] Balmer, H. (1956): Beiträge zur Geschichte der Erkenntnis des Erdmagnetismus; S. 261-277; Aarau.
- [BANH36] Banholzer, A. (1936): Die Auffassung physikalischer Sachverhalte im Schulalter. Dissertation. Universität Tübingen.
- [BARR87] Barrow, L.H. (1987): Magnet concepts and elementary students' misconceptions. In J. Novak, Ed., Proceedings of the 2. Int. Seminar Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics. Vol. III (pp. 17-20). Ithaca: Cornell University.
- [BERG92] Bergmann, L. / Schäfer, C. (1992): Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6: Festkörper Kapitel 8: Magnetismus in Festkörpern, de Gruyter. Berlin, New York.
- [BEYE02] Beyer, K. (2002): Handlungspropädeutischer Unterricht — Vorlesung. Universität zu Köln.
- [BLEI91] Bleichroth, W. / Dahncke, H. / Jung, W. / Kuhn, W. / Merzyn, G. / Weltner, K. (1991): Fachdidaktik Physik. Aulis Verlag Deubner, Köln.

- [BLEI99] Bleichroth, W. / Dahncke, H. / Jung, W. / Kuhn, W. / Merzyn, G. / Weltner, K. (1999): Fachdidaktik Physik. Aulis Verlag Deubner, Köln.
- [BORG98] Borges, A. T. / Gilbert, J. K. (1998): Models of magnetism. In: International Journal of Science Education, Vol. 20, No.3, 361-78.
- [BORN83] Born, G./ Druxes, H./ Siemsen, F. (1983): Kompendium Didaktik Physik. Franz Ehrenwirth Verlag, München.
- [BRAN97] Brandl, W. (1997): Lernen als „konstruktivistischer“ Prozess: Trugbild oder Wirklichkeit? In: Schulmagazin 5 bis 10, Heft 5/ 1997.
- [BREW81] Brewer, W. F. / Treyens, J. C. (1981): Role of schemata in memory for places. In: Cognitive Psychologie, 13, 207 – 230.
- [BUCH94] Buchholz, R. / Krücken, W. (1994) : Die Mercator-Projektion. Zu Ehren von Gerhard Mercator (1512-1594), Velten.
- [CAST83] Castelli, B. (1883): Discorso sopra la calamita. Bullettino di Bibliografia e di Studi delle Scienze Matematiche e Fisiche 16, 545-564.
- [CHEN86] Cheng, P. W. / Holyoak, K. J./ Nisbett, R. E. / Oliver, L.M. (1986): Pragmatic versus syntactic approaches to training deductive reasonings. Cognitive Psychology, 18, 293-328.
- [COLL69] Collins, A. M. / Quillian, M. R. (1969): Retrieval time from semantic memory. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 8, 240-247.
- [DORN04] Dorn, F. / Bader, F. / Oberholz, H. –W. (2004): Dorn-Bader Physik Gymnasium Sek I. Schroedel Verlag, Hannover.

- [DUI02] Duit, R. (2002): Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher & W. Schneider, Hrsg., Physikdidaktik in der Praxis (pp. 1-26). Springer, Berlin.
- [EDEL00] Edelmann, W. (2000): Lernpsychologie. Psychologie Verlags Union, 6.Auflage, Weinheim.
- [ERIC94] Erickson, G. (1994): Pupil's understanding of magnetism in a practical assessment context: The relationship between content, process and progression. In: Fensham, P. / Gunstone, R. / White, R. (eds), The Content of Science: A Constructivist Approach to its Teaching and Learning, Falmer Press, 80-97, London.
- [FINC05] Finckh, U. / Leitner, E. (2005): Kurze Geschichte des Kompasses. (www-Seite, Stand: 06.11.2005). Internet: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph07_g8/umwelt_technik/05orientierung/geschichte/geschichte.htm (Zugriff: 12.04.2006)
- [FONG86] Fong, G. T. / Krantz, D. H. / Nisbett, R. E. (1986): The effects of statistical training on thinking about everyday problems. Cognitive Psychology, 18, 253-292.
- [FRIE95] Friebe, J.G. (1995): Schlangeneier und Drachenzungen. Fossilien in Volkmedizin und Abwehrzauber. – Beiheft zur Sonderausstellung (23.09.1995 bis 07.01.1996), 44, Dornbirn (Vorarlberger Naturschau).
- [FRIE03] Friebe, J.G. (2003): Der Magnetstein (www-Seite, Stand: 2003). Internet: http://inatura.at/wissen/gem_9400.shtm (Zugriff: 05.11.2004)
- [GENT83] Gentner, D. (1983): Structur mapping: A theoretical framework for analogy. Cognitive Science, 7, 155-170.

- [GILB00] Gilbert, W. (1600): De magneticisque corporibus et de magno magnete tellure (Über den Magneten, die magnetischen Körper und den großen Magneten Erde), zit. nach Taylor: History, S.99
- [HALL03] Halliday, D. / Resnick, R. / Walker, J. (2003): Physik. Hrsg. d. dt. Übers. Stephan W. Koch. 1. Auflage, Weinheim.
- [HEIN87] Heineken, E. (1987): Das gnoseogenetische Prinzip der Psychologiedidaktik. In: Kowal, S. (Hrsg.) Schüler lernen Psychologie (S.48-79), Deutscher Psychologen Verlag, Bonn.
- [HEIN94a] Heineken, E. / Habermann, T. (1994): Lernpsychologie für den beruflichen Alltag. 3. Auflage, Sauer-Verlag GmbH, Heidelberg.
- [HEIN94b] Heineken, E. (1994): Ergonomische Studien – Wissenserwerb und Wissensabruf. Bericht Nr. 39, Duisburg.
- [HEIN05] Heineken, E. / Heineken, S. / Heineken, P. (2005): Die Koordinaten des Erfolgs: Lernen und Gedächtnis. Verlag Books on Demand GmbH, Norderstedt.
- [HERM78] Hermann, A. (1978): Lexikon - Geschichte der Physik A-Z. Aulis-Verlag, Deubner & Co KG.
- [HEß72] Heß, W./ Kühn, F./ Pfaff, R./ Raebiger, C./ Rang, O./ Spehr, E. (1972): Physik B1/2. Ernst Klett Verlag, Stuttgart.
- [HOUB72] Houben, H. (1972): Didaktik und Praxis der Schulphysik – Band 2; Verlag Herder; Freiburg, Basel, Wien. S.165ff
- [HUND72] Hund, F. (1972): Geschichte der physikalischen Begriffe, Mannheim.

- [IHNE94] Ihne, W. / Lottermoser, J. / Zöllner, W. (1994): Einführung in die Physik. Sekundarstufe I, Ausgabe E, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt am Main.
- [JUNG73] Jung, W. (1973): Fachliche Zulässigkeit aus didaktischer Sicht. IPN Seminar II, Kiel.
- [KATT97] Kattmann, U. u.a. (1997): Das Modell der didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. ZfDN,3, Heft 3, 3-18.
- [KIRC85] Kircher, E. (1985): Elementarisierung im Physikunterricht. Phy.did. 12, Heft 1, 17-23 u. Heft 4, 24-38.
- [KIRC95] Kircher, E. (1995): Studien der Physikdidaktik. IPN, Kiel.
- [KIRC00] Kircher, E./ Girwidz, R./ Häußler, R. (2000): Physikdidaktik — Eine Einführung in Theorie und Praxis. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden.
- [KLIX02] Klix, F. (2002): Denken. In: Lexikon der Psychologie auf CD—Rom. Spektrum — Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [KLOS94] Kloss, A. (1994): Geschichte des Magnetismus, vde-Verlag, S.181, Berlin-Offenbach.
- [KÖHL17] Köhler, W. (1917): Intelligenzprüfung an Menschenaffen. Springer-Verlag, Berlin.
- [KRIE99] Kriesling, S. (1999): Physikerbiographien – André Marie Ampere (php-Datei, Stand:1999). Internet: http://physicbox.uni-graz.at/museum/physiker/physiker_ampere.php (Zugriff: 03.07.2007)

- [KRÜC94] Krücken, W. / Milz, J. (1994): Gerhard Mercator. Weltkarte ad usum navigatium, Duisburg.
- [KULT93] Kultusministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (1993): Richtlinien und Lehrpläne, Physik, Gymnasium Sekundarstufe I - Die Schule in Nordrhein-Westfalen. Verlagsgesellschaft Ritterbach mbH, Frechen.
- [MAYE85] Mayer–Kuckuk, T. (1985): Atomphysik. BG Teubner Studienbücher, 3.Auflage. Stuttgart.
- [MILL55] Miller, W. (1955): Nachruf des Journalisten Miller, Life magazine 2. Mai 1955. Internet: <http://home.arcor.de/eberhard.liss/zitate/einstein-zitate.htm> (Zugriff: 21.05.2006)
- [MINI99] Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1999): Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. 1. Auflage, Ritterbach Verlag, Frechen.
- [NACH79] Nachtigall, D. (1979): Physikunterricht und die Entwicklung von Denkstrukturen. In: Naturwissenschaften im Unterricht, 27, 3.
- [NAUM07] Naumann & Göbel (2007): Wissen kompakt – Physik – Eine grundlegende Einführung mit den wichtigsten Formeln und Gesetzen, Naumann & Göbel Verlagsgesellschaft mbH, Köln.
- [OPEL05] Opel, M. (2005): Magnetismus - Vorlesungsskript zur Vorlesung Magnetismus (PH-E23-6) des WS 2004/2005, TU München.
- [PIAG00] Piaget, J./ Inhelder, B. (2000): Die Psychologie des Kindes. Deutscher Taschenbuch Verlag, München.

- [REED91] Reed, S. K. / Bolstad, C. A. (1991): Use of examples and procedures in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 13, 124-139.
- [REHF03] Rehfeld, R. (2003): Magnetstein (www-Seite, Stand: 03.08.2003). Internet: <http://www.wundersamessammelsurium.de/Magnetisches/Magnetstein/> (Zugriff: 04.11.2004)
- [REIS03] Reisinger, J. (2003): Modellbegriff und Modellbildung in der Physik und in der Physikdidaktik (pdf-Datei, Stand: 25.04.2003). Internet: <http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/Vorl/Modelle/Modelle.pdf> (Zugriff: 22.06.2007)
- [RENK96] Renkl, A. (1996): Träges Wissen: Wenn Erlerntes nicht genutzt wird. In: *Psychologische Rundschau*, 47, 78-92, Hogrefe-Verlag, Göttingen.
- [RICH93] Richtlinien und Lehrpläne für das Gymnasium — Sek I —NRW (1993), Physik Heft 3411, Ritterbach Verlag, Frechen.
- [SCHL06] Schlemmer, H.-P. (2006): Chronik- Zur Geschichte des Magnetismus (pdf-Datei, Stand: 01.2006) Internet: http://www.medical.siemens.com/siemens/de_DE/rg_marcom_FBAs/files/Patienteninformationen/MR_Geschichte_Magentismus.pdf (Zugriff: 22.12.2006)
- [SCHR79] Schröder, W./ Sichelschmidt, R./ Stiegler, L. / Vestner, H. (1979): *Natur und Technik – Physik und Chemie 5/6*. Cornelsen - Velhagen & Klasing GmbH & Co, Verlag für Lehrmedien KG, Berlin.
- [SERG00] Serges Medien (2000): *Grundstock des Wissens – Physik, Fakten nachschlagen, Zusammenhänge erkennen, Prüfungen vorbereiten*. Serges Medien GmbH, Köln.

- [SILV86] Silver, E. A. (1986): Using conceptual and procedural knowledge: A focus on relationships. In: Hiebert, J. (Eds.), Conceptual and procedural knowledge: the case of mathematics, 181-198, Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [SIMO04] Simonyi, K. (2004): Kulturgeschichte der Physik - Von den Anfängen bis heute. Deutsch Harri Verlag, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage.
- [STAC75] Stachowiak, H. (1975): Denken und Erkennen im kybernetischen Modell. Springer Verlag, Nachdruck der 2.Auflage, Wien, New York.
- [STAU89] Stauffer, D. (1989): Theoretische Physik: ein Kurzlehrbuch und Repetitorium. Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg.
- [STER01a] Stern, D. P. (2001): Magneteisenstein - der „Leitstein“ (www-Seite, Stand: 17.09.2001). Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Dlodestn.htm> (Zugriff: 04.11.2004)
- [STER01b] Stern, D. P. (2001): De Magnete (www-Seite, Stand: 17.09.2001). Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Dmagrev.htm> (Zugriff: 04.11.2004)
- [STER01c] Stern, D. P. (2001): Selbst experimentieren wie Gilbert (www-Seite, Stand: 17.09.2001). Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Dinducmg.htm> (Zugriff: 04.11.2004)
- [STER01d] Stern, D. P. (2001): Oertsted und Ampere verbinden Elektrizität und Magnetismus (www-Seite, Stand: 17.09.2001). Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Doersted.htm> (Zugriff: 04.11.2004)
- [STER01e] Stern, D. P. (2001): Mehr über Gilberts Werk (www-Seite, Stand: 17.09.2001). Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Dmagadd.htm> (Zugriff: 04.11.2004)

- [THIS97] Thissen, F. (1997): Das Lernen neu erfinden - konstruktivistische Grundlagen einer Multimedia-Didaktik. In: Uwe Beck / Winfried Sommer (Hrsg.): Learntec 97. Europäischer Kongreß für Bildungstechnologie und betriebliche Bildung. Tagungsband, S. 69-79, Karlsruhe.
- [VERS94] Verschaffel, L. / DeCorte, E. / Lasure, S. (1994): Realistic considerations in mathematical modelling of school arithmetic word problems. *Learning and Instruction*, 4, 273 – 294.
- [VOLL05] Vollhardt, D. (2005): Elektronische Korrelationen und Magnetismus: Eine Einführung (pdf-Datei, Stand: 07.2005). Internet: http://www.physik.uni-augsburg.de/theo3/Research/research_fest.vollha.de.shtml (Zugriff: 07.01.2006)
- [WELT82] Weltner, M. (1982): Elementarisierung physikalischer und technischer Sachverhalte als eine Aufgabe der Didaktik des Physikunterrichts. In: Fischler, H. (Hrsg.): *Lehren und Lernen im Physikunterricht*. Aulis, 192-219, Köln.
- [WERT64] Wertheimer, M. (1964): *Produktives Denken*. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt am Main.
- [ZELL71] Zeller, E. (1971): *Sage und Schreibe. Geschichte*, DVA, Stuttgart.

The POE situations and eliciting questions

- (1) An object described as a magnet is placed in front of the interviewee.
 - (a) What does a magnet do?
 - (b) What is magnetism like?
- (2) A number of small samples of different materials (copper, steel paper clip, aluminium, brass, wood, rubber, polystyrene, PVC) are placed in front of the interviewee.
 - (c) What will happen to these objects when the magnet is placed near them?
 - (d) Why are some of these objects attracted to the magnet?
 - (e) How can a magnet act on some objects even at a distance?
 - (f) Why is it that the magnet behaves in this way?
- (3) Some iron filings are sprinkled onto a piece of card.
 - (g) What will happen when the iron filings on the card are placed over the magnet?
 - (h) Why have the iron filings moved into the pattern that you see?
- (4) An object, described as a compass, is placed on the table. The magnet is then moved towards it.
 - (i) What will happen when you bring the magnet near to the compass?
 - (j) Why will the compass do that?
- (5) A magnet is placed on the table and a second magnet is moved along the surface towards it.
 - (k) Why are the magnets attracting/repelling each other?

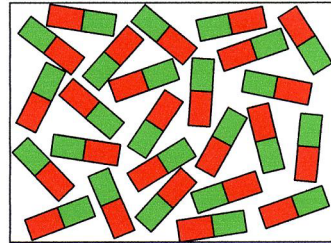
Interview – Fragesequenzen nach Borges und Gilbert [BORG98]

Magnetisierung von Eisen

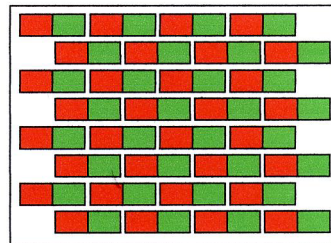
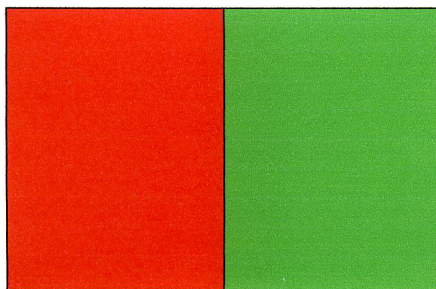
Ho

Eisen

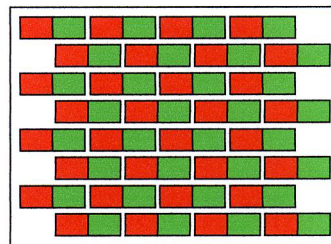
1. Ohne Magnet



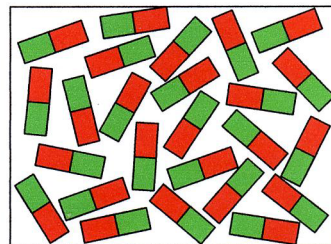
2. Mit Magnet



3. Magnet wieder weggenommen



4. Eisen erhitzt/ fallen gelassen



Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Beate Hees, geb. Holtschneider
Geburtsdatum: 02. Februar 1980
Geburtsort: Leverkusen

Ausbildung

1986 – 1990	Grundschule Waldschule, Leverkusen - Waldsiedlung
1990 – 1999	Freiherr-vom-Stein Gymnasium, Leverkusen
1999	Abitur
1999 – 2004	Mathematik- und Physikstudium auf Lehramt für die Sekundarstufe I und II, Universität zu Köln
Mai 2004	1. Staatsexamen
Juni 2004	Promotionsbeginn in der Physik-Didaktik, Universität Duisburg-Essen
2005 – 2007	Referendariat am Freiherr-vom-Stein Gymnasium, Leverkusen
Nov. 2006	2. Staatsexamen
Ab Febr. 2007	Studienrätin für die Fächer Mathematik und Physik in der Sekundarstufe I und II am Freiherr-vom-Stein Gymnasium, Leverkusen
21.06.2008	geheiratet